



# 16°

# CONFIBSIG

XVI Conferencia  
Iberoamericana de Sistemas  
de Información Geográfica



SOCIEDAD  
IBEROAMERICANA  
DE SISTEMAS DE  
INFORMACIÓN  
GEOGRÁFICA



UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY  
50 AÑOS

**UDA - IERSE**

Instituto de Estudios de Régimen  
Seccional del Ecuador - Adscrito al  
Vicerrectorado de Investigaciones  
de la Universidad del Azuay

# MEMORIA

27 al 29 de septiembre de 2017  
Cuenca, Ecuador



# 16°

# CON Fib SIG

XVI Conferencia  
Iberoamericana de Sistemas  
de Información Geográfica



**UDA - IERSE**

Instituto de Estudios de Régimen  
Seccional del Ecuador - Adscrito al  
Vicerrectorado de Investigaciones  
de la Universidad del Azuay

# MEMORIA

27 al 29 de septiembre de 2017  
Cuenca, Ecuador



## Comité Científico Internacional

Dr. Manuel Fuenzalida  
Universidad Alberto Hurtado, Chile

Dr. Gustavo Buzai  
Universidad Nacional de Luján, Argentina

Dr. Emilio Chuvieco Salinero  
Universidad de Alcalá, España

Dra. Montserrat Gómez Delgado  
Universidad de Alcalá, España

Dr. Julio Cesar Moraga Peralta  
Universidad Nacional, Costa Rica

Dra. María Cristina Pineda de Carías  
Universidad Nacional Autónoma de Honduras, Honduras

Dr. Antonio Moreno Jiménez  
Universidad Autónoma de Madrid, España

Dr. José Seguinot Barbosa  
Universidad de Puerto Rico, Puerto Rico

Dr. Noel Pineda Jaimes  
Universidad Autónoma del Estado de México, México

Dra. Marcela Virginia Santana Juarez  
Universidad Autónoma del Estado de México, México

Dr. Paulo Fitz  
Centro Universitario Ritter dos Reis, Brasil

M.Sc. Heinrich Hasenack  
UFRGS Centro de Ecología, Brasil

Dr. Francisco Ariza López  
Universidad de Jaén, España

Dr. Domingo Gómez Orea  
Universidad Politécnica de Madrid, España

Dr. Urbano Fra Paleo  
Universidad de Extremadura, España

Dr. Santiago Linares  
Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

Dr. Edson Luís Piroli  
Universidade Estadual Paulista, Brasil

Mst. Omar Delgado Inga  
Universidad del Azuay, Ecuador



Rector:  
Vicerrectora Académica:  
Vicerrector de Investigaciones:  
Decano Administrativo y Financiero:  
Secretaría General:

PhD. Francisco Salgado Arteaga  
PhD. Martha Cobos Cali  
Mst. Jacinto Guillén García  
Eco. Luis Mario Cabrera  
Dr. Ximena Mejía Moscoso

#### **Comité organizador local**

Coordinador: M.Sc. Omar Delgado Inga

Mst. Paúl Ochoa Arias  
Mst. Chester Sellers Walden  
Mst. Diego Pacheco Prado  
Mst. Julia Martínez Gavilanes  
Eco. Martha Castro Espinoza  
Eco. Mario Merchán Barros  
Mst. Jheimy Pacheco Niveló  
Ing. Fernanda Marín Serrano

Ing. Alexandra Cabrera Lituma  
Ing. Francisco Salgado Castillo  
Ing. Santiago Carranco Zumba  
Ing. Lorena Orellana Samaniego  
Ing. Christian Tacuri Ortega  
Blgo. Carlos Tenesaca Pacheco  
Ing. Edgar Toledo López  
Téc. Luis Pacheco Portilla

Diseño: Mst. Sebastián Egas Loaiza

eISBN: 978-9978-325-87-2

ISBN: 978-9978-325-86-5



Los titulares de la obra contenida en este documento autorizan la copia y distribución de la misma bajo las condiciones de Creative Commons:

**ATRIBUCIÓN, NO COMERCIAL.**

**ATRIBUCIÓN:** Usted debe reconocer el crédito de la obra de manera adecuada y completa. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que tiene el apoyo del licenciante o lo recibe por el uso que hace.

**NO COMERCIAL:** Usted no puede hacer uso del material con fines comerciales.

#### **NOTA DE DESCARGO:**

La responsabilidad por las ideas, contenidos e imágenes expuestas en este libro corresponde exclusivamente a sus autores.

# Contenido

Este libro es una compilación de los trabajos presentados en la XVI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica-CONFIBSIG, realizada en Cuenca Ecuador del 27 al 29 de Septiembre del 2017, en el Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador de la Universidad del Azuay.

Los capítulos de este libro, al igual que la XVI CONFIBSIG - 2017, están organizados en siete ejes temáticos:

Presentación.....	9
Introducción.....	11
<b>Eje 1: Formación y enseñanza en Tecnologías de la Información Geográfica</b>	
Cartografía participativa: análisis de tres plataformas de colaboración para la integración de información geográfica voluntaria.....	15
Experiencia de la instrucción de los cursos de bases de datos para la maestría profesional en sistemas de información geográfica y teledetección del programa interuniversitario de la Universidad de Costa Rica y la Universidad Nacional de Costa Rica.....	25
La enseñanza de la geografía (SIG) en la Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica, periodo 2013-2016.....	31
<b>Eje 2: Recursos naturales, ambiente y cambio climático</b>	
Análisis de la sequía en la cuenca del Paute mediante el índice de precipitación estandarizado (SPI).....	41
Análisis multicriterio basado en GIS para identificar potenciales áreas de emplazamiento de un relleno sanitario mancomunado en la provincia del Azuay.....	51
Bosques de la Región Amazónica Ecuatoriana: ¿Qué nos dicen las cifras de deforestación de los últimos 15 años? .....	63
Contaminación por ruido en centros urbanos.....	77
El SIGAM: desarrollo de un sistema de información geológico ambiental minero para gestión de datos en el ámbito estatal.....	81
Geotecnologías aplicadas ao estudo de desastres naturais causados pela mudança no uso da terra em microbacia hidrográfica .....	89
Identificación de la importancia de las características de bosques de polylepsis para la comunidad de aves: un enfoque de red a escala de paisaje.....	95
Análisis y modelado de episodios de intensa contaminación por PM <sub>10</sub> en Madrid con Sistemas de Información Geográfica .....	105
Optimización de una red de monitoreo de precipitación usando modelos Geostatísticos: caso de estudio en la cuenca del río Paute, Ecuador .....	115

Sistemas de Información Geográfica participativa para la gestión integrada de riesgos en poblaciones vulnerables de la periferia de Arequipa.....	125
Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé .....	133

### **Eje 3: Salud y seguridad alimentaria**

Observatorio geográfico de salud y riesgos en México: distribución espacial de la mortalidad infantil en el Estado de México, 2010.....	141
Estudio comparado del efecto del ascenso del nivel del mar (ANM) sobre la infraestructura de salud y la población en las ciudades de Puerto Rico y del Caribe .....	155

### **Eje 4: Infraestructura de datos espaciales**

Infraestructura de datos espaciales del sistema de información geológico ambiental minero (SIGAM) del servicio geológico y minero argentino (SEGEMAR).....	165
Inventario de parques y jardines de la ciudad de Cuenca con UAV y smartphones .....	173
Infraestructuras de datos espaciales: Propuesta de implementación en la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Universidad Nacional, Costa Rica .....	181

### **Eje 5: Cartografía, catastro y Sistemas de Información Geográfica municipales**

Construcción de modelos combinando la econometría y el aprendizaje de máquina para el avalúo catastral de predios urbanos y rurales .....	189
Evaluación de Método de Corrección Geométrica de Fotografía Aérea escala 1:1.000 capturada por vehículos aéreos no tripulados estableciendo una red Geodésica de cuarto orden.....	195
Georreferenciación de mapas históricos de Sudamérica para el desarrollo de una galería de mapas web .....	209
Implementación del sistema de información geográfico catastral del cantón Déleg.....	215
La regularización predial en el Ecuador y su relación con el incremento del acceso al crédito.....	221
Nomenclátor y SIG para la gestión de topónimos. Parroquia Sayausí, Cuenca-Ecuador.....	233

### **Eje 6: Gestión y ordenamiento territorial**

Análisis espacial y evaluación de zonas de potenciales conflictos ambientales, productivos y patrimoniales ante la expansión urbana en la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina). Aplicación: La expansión urbana en Luján y los potenciales conflictos entre usos del suelo .....	245
Caracterización socioespacial de la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina).....	253
Disponibilidad y accesibilidad a los espacios verdes públicos en la ciudad de Río Cuarto (Argentina) .....	261



Identificación de áreas con potencial conflicto entre usos del suelo en la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina).....	267
Integración de múltiples datos y modelos para orientar la zonificación del suelo no urbanizable en Asturias (España).....	275
La ordenación territorial y las fuentes renovables de energía .....	287
Prospectiva del uso del suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial - Caso cantón Cuenca.....	293
Métodos de registros en fincas agropecuarias en la Región Huetar Norte de Costa Rica.....	301
Planificación territorial: uso y ocupación del suelo rural. Caso cantón Pucará, provincia del Azuay .....	309
Desarrollo energético local en función de la mitigación al cambio climático.....	319

### **Eje 7: Métodos y análisis con Tecnologías de la Información Geográfica**

Análise de tendência sazonal de série temporal de EVI (Índice de Vegetação Realçado) na bacia do Rio Pardo - SP - Brasil por meio da ferramenta Earth Trends Modeler .....	329
Uso de SIG para análisis de impactos da expansão urbana sobre morfologias do relevo nas zonas leste e sul do município de Marília (São Paulo, Brasil).....	343
Análisis de métodos para la cartografía de incendios forestales en el cantón Cuenca a partir de imágenes TERRA/AQUA MODIS .....	349
Análisis delictivo en el cantón Cuenca, Ecuador, aplicando técnicas espaciales apoyadas por SIG libre .....	361
Detección de patrones secuenciales generalizados de movilidad de ciclistas a partir de datos crowdsourcing.....	367
El análisis de umbral como identificador de patrones delictuales en varios niveles geográficos del cantón Cuenca, Ecuador año 2013 al 2016 .....	375
Estimación de la concentración de material particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área urbana de la ciudad de Cuenca.....	381
Calibración de un Modelo Basado en Agentes para el estudio del peligro de inundación en el río Santa Bárbara.....	391
Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador.....	399
Sistemas de seguridad ciudadana por georeferenciación y geolocalización para zonas rurales del cantón Cuenca incorporados al SIS ECU 9-1-1 del Ecuador .....	413
Valoración de la fragilidad visual del paisaje del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama mediante evaluación indirecta por componentes .....	419
Tecnologías de Información Geográfica en el diagnóstico territorial participativo con comunidades indígenas. Caso de estudio en territorios Mapuche Lafkenches de Tirúa (38°20'S y 73°30'W), Chile.....	427

Impacto de los incendios forestales en las áreas protegidas de Costa Rica.....	433
Análisis y simulación espacio temporal de la dinámica de las zonas agrícolas mediante Sistemas de Información Geográfica .....	441
Análisis geográfico para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia de residuos agropecuarios en la provincia de Manabí, Ecuador.....	455
Consideraciones metodológicas para la elaboración de una prospección arqueológica utilizando herramientas SIG .....	467

## Presentación

A lo largo de los años la Geomática ha alcanzado “un alto grado de desarrollo tecnológico” satisfaciendo las necesidades de los usuarios a “costes cada vez más asequibles y con un creciente número de bases de datos geográficas” al punto que en nuestros días el factor tecnológico es de relativa importancia frente a “las dificultades organizativas y de formación” (Comas Vila - Pujol Causa, 1993). Las aplicaciones que ha encontrado esta ciencia a través de las TIG's son diversas: geografía, ordenación, planificación y gestión territorial, biología, minería, vialidad e infraestructura, recursos naturales, condiciones ambientales, demografía, población, entre otras. Sin embargo, a pesar del gran potencial como herramienta, su utilización y difusión es aún limitada en profesionales que trabajan con información geográfica. Por lo que es indispensable “una adecuada formación de profesionales ligados a la Geomática” para incorporar estas nuevas tecnologías en las actividades mencionadas.

Las nuevas tecnologías de la información contribuyen a caracterizar, gestionar y administrar recursos naturales sobre un espacio geográfico. Entre las nuevas tecnologías se encuentran, los sistemas satelitales de navegación global, los sensores remotos y los sistemas de información geográfica; herramientas en conjunto denominadas Tecnologías de la Información Geográfica TIG's, que a su vez forman parte de la Geomática.

Las aplicaciones que ha encontrado la Geomática a través de las TIG's son diversas: geografía, ordenación del territorio, planificación territorial, gestión territorial, biología, minería, vialidad e infraestructura, recursos naturales, demografía, población, entre otros. Sin embargo a pesar del gran potencial que tiene la Geomática a través de las TIG's, la utilización y difusión es limitada en profesionales que trabajan con información geográfica.

El levantamiento de información georreferenciada se lo puede realizar empleando dispositivos móviles con precisión de 10 metros en América del Sur, hasta equipos diferenciales con procesamiento en tiempo real con precisión de centímetros empleando tecnologías de los sistemas satelitales de navegación global, por lo que constituyen la principal herramienta de información primaria para levantamiento de datos en terreno.

Los sensores remotos incluyen técnicas de fotografía aérea capturada con vehículos aéreos no tripulados (drones), y de uso de imágenes satelitales e información LIDAR, que permiten extraer y generar información temática georreferenciada de grandes extensiones del territorio cada vez más precisa con sensores de alta resolución espacial. En los últimos años se utilizan sensores para monitorear variables ambientales que contribuyen a tener información instantánea (tiempo real) que contribuyen en mejorar la calidad de vida y apoyar en la toma de decisiones.

El National Center for Geographic Information and Analysis (N.C.G.I.A) de Estados Unidos, define a los sistemas de información geográfica (S.I.G o G.I.S. por las siglas en inglés) () como, “Un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados, para resolver problemas complejos de planificación y gestión”. De manera más simple un SIG puede contemplar un conjunto de temas (mapas temáticos) de la misma porción del territorio, donde un lugar concreto tiene la misma localización (las mismas coordenadas) en todos los mapas incluidos en el sistema de información.

De este modo, en un SIG se pueden integrar datos de mediciones con sistemas satelitales de navegación global, la información resultante proveniente de sensores remotos, cartografía digital

bases de datos, entre otros, por lo que resulta posible realizar un análisis de sus características espaciales y temáticas para obtener un mejor conocimiento del área de estudio. (Bosque - Sendra, Sistemas de Información Geográfica - 1997, segunda edición).

Internet en los últimos años se ha convertido en un medio por el cual se distribuye la información geográfica a través de las infraestructuras de datos espaciales (IDE) que facilitan el acceso a la geoinformación proveniente de fuentes diversas (pública o privada) a través del establecimiento de normas, estándares y políticas para hacer que la información sea interoperable. Las IDE permiten a través de la web, descubrir la geoinformación existente por lo que en la actualidad la puerta de acceso a la información geográfica de un país se realiza a través de nodos nacionales que sirven como línea base. Un mecanismo de acceso a esta información son los Geovisores que constituyen herramientas web para trabajar con información geográfica en línea, emulando la funcionalidad básica de un SIG de escritorio.

La XVI CONFIBSIG de Cuenca Ecuador cuenta entre sus asistentes a investigadores y participantes procedentes de diez países y a ponentes por ejes temáticos así: en el eje 1 tres; en el eje 2 once; en el eje 3 dos; en el eje 4 tres; en el eje 5 seis; en el eje 6 diez y en el eje 7 dieciséis, cuyos artículos presentados en la conferencia se reproducen íntegramente; ponencias que desde diferentes visiones para investigación han utilizado como herramienta a los sistemas de información geográfica.

# Introducción

Las investigaciones de los ponentes en la XVI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica - CONFIBSIG 2017 provienen de diez países iberoamericanos y está organizada en siete ejes temáticos:

## **E-1 Formación y enseñanza en Tecnologías de la Información Geográfica**

En esta sección se resaltan la enseñanza de la geografía y de las bases de datos a través de los sistemas de información geográfica, en programas de maestría de tres universidades de Costa Rica. Un aspecto importante que se aborda en este eje, es el levantamiento de información cartográfica participativa y su integración a plataformas de información geográfica voluntaria y abierta.

## **E-2 Recursos naturales, ambiente y cambio climático**

En este eje temático se presentan trabajos de investigación sobre contaminación del aire, del suelo por metales pesados y de monitoreo de ruido ambiente. Adicionalmente se reportan resultados sobre cuencas hídricas con análisis de sequía mediante el índice de precipitación estandarizado, optimización de red de monitoreo de precipitación, desarrollo de un sistema de información geológico ambiental minero para gestión de datos, SIG participativo para la gestión integrada de riesgos, y análisis multicriterio basado en SIG para relleno sanitario. Se concluye con artículos destacados sobre bosques de la región amazónica ecuatoriana, características de bosques de Polylepis para la comunidad de aves y estado de conservación de áreas protegidas mediante series temporales con índices de vegetación.

## **E-3 Salud y seguridad alimentaria**

En este eje se presentan los resultados del observatorio geográfico de salud y riesgos en México, y los resultados del estudio de los efectos del ascenso del nivel del mar sobre la población y la infraestructura de salud en ciudades de Puerto Rico y el Caribe.

## **E-4 Infraestructura de datos espaciales**

Las infraestructuras de datos espaciales se han convertido en una importante herramienta que integra diferentes fuentes de geoinformación, permitiendo una adecuada difusión de la misma como apoyo a la toma de decisiones. En esta oportunidad se da cuenta de las experiencias en la conformación de inventarios forestales en parques urbanos, información geológica minera a nivel nacional en Argentina, así como la propuesta académica de implementación de una IDE.

## **E-5 Cartografía, catastro y Sistemas de Información Geográfica municipales**

Las tecnologías de la información geográfica han contribuido de manera significativa en la última década en la elaboración de cartografía catastral que integrada a los sistemas de información geográfica han permitido que la administración y la gestión de la información sea multifuncional integrando los aspectos físico, jurídico y socioeconómico. En esta sección se

presentan trabajos sobre regularización predial en Ecuador, generación de ortofotografía con vehículos aéreos no tripulados, SIG catastral, modelos de avalúo catastral urbano y rural, nomenclátor y SIG para la gestión de topónimos, georreferenciación de mapas históricos.

#### **E-6 Gestión y ordenamiento territorial**

La gestión territorial pretende cristalizar las propuestas de ordenamiento territorial en los ámbitos físico, social y económico. En este apartado se presentan los resultados de investigaciones sobre caracterización socio espacial, levantamiento de fincas productivas, identificación de conflictos ambientales, productivos y patrimoniales, demanda y accesibilidad de espacios verdes públicos, zonificación de suelo no urbanizable, prospectiva de uso del suelo, uso y ocupación del suelo rural, ordenación territorial y fuentes de energía renovable.

#### **E-7 Métodos y análisis con Tecnologías de la Información Geográfica**

En esta sección se presentan trabajos sobre el uso de las TIG en el diagnóstico territorial, detección de patrones de movilidad de ciclistas, uso de los SIG para el análisis de impactos provocados por expansión urbana. En cuencas hidrográficas el modelo basado en agentes para el estudio de peligros de inundación, morfología interpretativa empleando datos LIDAR, análisis de tendencia con series Temporales EVI. Estimación de material particulado con sensores remotos, aplicación de los SIG en prospección arqueológica, análisis espacio temporal de la dinámica de zonas agrícolas con SIG, análisis geográfico para implantación de sistemas de tratamiento de residuos agropecuarios. Un componente importante de esta sección es el impacto de incendios forestales en áreas protegidas, análisis de métodos de cartografía de incendios forestales mediante imágenes Terra/Agua MODIS, valoración de fragilidad visual del paisaje mediante valoración indirecta por componentes. Esta sección abarca los trabajos importantes en temas de seguridad ciudadana a través de análisis delictivo aplicando técnicas espaciales, análisis de umbral como identificador de patrones delictuales, y sistemas de seguridad ciudadana por georreferenciación para zonas rurales.



# Formación y enseñanza en Tecnologías de la Información Geográfica





# Cartografía participativa: análisis de tres plataformas de colaboración para la integración de información geográfica voluntaria

Hernández Zetina Sandra Lucía<sup>1</sup>, González Becerril Lidia Alejandra<sup>2</sup>

1 Facultad de Geografía/Universidad Autónoma del Estado de México.

Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria/Toluca de Lerdo, Estado de México/México.  
slhernandez@uaemex.mx

2 Facultad de Geografía/Universidad Autónoma del Estado de México.

Cerro de Coatepec s/n, Ciudad Universitaria/Toluca de Lerdo, Estado de México/México.  
lagonalez@uaemex.mx

## RESUMEN

El uso de información geográfica se ha extendido a diversas áreas del conocimiento y ámbitos de aplicación; siendo la cartografía participativa (CP) un proceso que ha cobrado relevancia en los últimos años, para la adquisición y actualización de los datos geoespaciales. Si bien existen diversas acepciones de este tipo de cartografía, se distinguen tres elementos importantes en todas ellas: a) la socialización de los medios de producción geográfica; b) la disponibilidad de datos cartográficos; c) y la necesidad de ubicar diferentes tipos de entidades sobre el territorio. En este trabajo se muestran los resultados del comparativo de tres plataformas (OpenStreetMap México, HERE Maps y el proyecto de Cartografía Participativa del INEGI) de apoyo a la CP, y el diseño de las estrategias didácticas para integrar los conceptos y metodologías de los elementos geoespaciales de la asignatura involucrada, en la formación del Licenciado en Geoinformática. En la metodología empleada se establecieron los siguientes procesos: 1) Elección de las plataformas a analizar; 2) Vinculación institucional con las organizaciones que representan a dichas plataformas; 3) Definición de los elementos comparativos entre plataformas; 4) Integración de las plataformas como recurso didáctico del programa de clase de la asignatura; 5) Presentación de resultados.

Dentro de los principales resultados, se generaron eventos académicos y experiencias de aprendizaje para los estudiantes, con los cuales se logró la actualización de la cartografía del campus de Ciudad Universitaria dentro de la plataforma OSM y el establecimiento de colaboración institucional con HERE Maps e INEGI, respectivamente.

Palabras clave: **cartografía participativa, información geográfica voluntaria, geoinformática, datos abiertos.**

## ABSTRACT

*The use of geographic information has been extended to several knowledge and application areas, been the participatory mapping a process that has gain relevance in the recent years, for the acquisition and update of geospatial data. As well as various meanings of this kind of mapping exists, we can distinguish three important elements in each one of them: a) socialization of the geographic production media; b) availability of mapping data; c) and the*

need to locate different types of entities on the ground-. In this paper we show the results of the comparative between three platforms (OpenStreetMap México, HERE Maps, and the Project of participatory mapping of INEGI) of support to the participatory mapping, and the design of the didactic strategies to integrate the concepts and methodology of the geospatial elements of the class for the bachelors degree in Geoinformatic. As a part of the used methodology, it defines the next process: 1) election of the platforms to analyze; 2) Institutional bonding which the representing organizations of those platforms; 3) Definition of the comparative elements between platforms; 4) Integration of the platforms as a didactic resource to the class program of the learning unit; 5) Results presentation.

Within main results, we get the update of the mapping of the university campus in the OSM platform and the establishment of institutional collaboration with HERE Maps and INEGI.

**Keywords:** Participative mapping, volunteer geographic information, geoinformatics, open data.

## I. INTRODUCCIÓN

La elaboración de cartografía en las últimas décadas, ha modificado las formas en las que, tradicionalmente se conceptualizaba, a partir de la introducción de Tecnologías de Información Geográfica (TIG), lo que ha impactado principalmente en:

La transformación de procedimientos analógicos en procedimientos digitales, la confluencia tecnológica con centro en los SIG, la circulación de información con base en Internet, el desarrollo de la geotecnósfera, el amplio interés científico disciplinario por la dimensión espacial y finalmente, el interés ciudadano por la localización. (Buzai, 2014, p.20)

En este contexto, y considerando el punto del interés ciudadano por la localización, la cartografía participativa cobra gran relevancia en diversas disciplinas y/o contextos. Se tienen diversos conceptos para definir el proceso de mapeo colaborativo: información geográfica voluntaria, crowdsourcing de información geográfica, cartografía participativa, cartografía colaborativa, e incluso en algunos casos, se llega a términos mucho más profundos, como lo representa la neogeografía. La apropiación de todos ellos, como parte de la formación de especialistas en ciencia y tecnología de información geográfica, se torna importante, puesto que éstos cubren un doble perfil: son usuarios de los datos generados a partir de estas colaboraciones y, al mismo tiempo, se convierten en generadores de los mismos. Es por ello que, dentro del proceso de enseñanza y aprendizaje de las asignaturas relacionadas con cartografía, los estudiantes deberán tener experiencias que los involucren en el levantamiento de datos a partir de colaboraciones voluntarias, que impliquen hacerlo con las herramientas y plataformas más adecuadas, con base al alcance de los proyectos que consumirán estos datos, así como con los recursos disponibles para su mejor desarrollo.

El proyecto de análisis de plataformas de colaboración para la integración de información geográfica voluntaria se desarrolló como parte de las estrategias didácticas para la impartición de la asignatura "Métodos de representación cartográfica", la cual se ubica en el segundo periodo del programa educativo de la Licenciatura en Geoinformática. En dicho proyecto se integraron elementos que permitieron al estudiante conceptualizar las principales formas de representación de los elementos geográficos, la importancia de la contribución en la adquisición de datos geoespaciales, y las diversas formas de vinculación con instituciones u organismos relacionados con este tipo de procesos colaborativos en la formación académica.

## II. MÉTODO

Para el propósito de este proyecto, se consideró una propues-

ta metodológica basada en los siguientes puntos: 1) Elección de las plataformas a analizar; 2) Vinculación institucional con las organizaciones que representan a dichas plataformas; 3) Definición de los elementos comparativos entre plataformas; 4) Integración de las plataformas como recurso didáctico del programa de clase de la asignatura; 5) Presentación de resultados. Cada uno de estos pasos se describen a continuación, en donde también se especifican las principales actividades llevadas a cabo.

### II.1 ELECCIÓN DE LAS PLATAFORMAS ANALIZADAS

Existen diversas instituciones a nivel mundial que generan datos geográficos, sin embargo, en muchas de las ocasiones estos son restringidos y no son de uso libre. En este sentido, se eligieron tres plataformas que contribuyen con la generación y/o actualización de datos en un ambiente colaborativo, siendo éstas: OpenStreetMap México (fundación), HERE Maps (empresa) y el proyecto de Cartografía Participativa del INEGI (institución de gobierno). Cada una de éstas se detalla a continuación:

Los inicios de OpenStreetMap (OSM) datan del año 2004, sin embargo como fundación inicia en el 2006 en Inglaterra; es considerada como un proyecto colaborativo a nivel mundial, que permite crear mapas libres y editables realizados por las personas para visualizar, modificar y utilizar datos geográficos de cualquier parte del mundo.

La participación voluntaria para la actualización de datos geográficos se hace a través del Editor ID (ver figura 1), que permite mapear desde diversas fuentes de datos como imágenes de satélite y aéreas, GPS, entre otros, éste requiere de una conexión activa a Internet. Sin embargo, también se puede contribuir a partir de receptores móviles de aplicaciones Android y/o iOS.

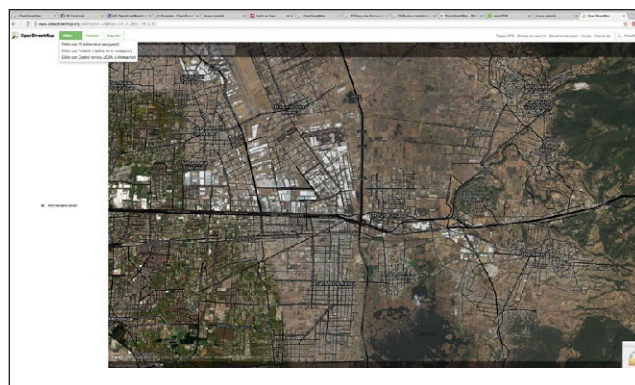


Figura 1. Página del Editor ID de OSM.  
Fuente: [www.openstreetmap.org](http://www.openstreetmap.org)

La contribución inicia con la obtención de un registro en la plataforma de OSM (ver figura 2). La información solicitada es el correo electrónico, el nombre con el que se identificará y una contraseña para el registro, se indica la privacidad con la que opera la fundación, asimismo, se especifica que se debe validar y/o confirmar la cuenta creada.

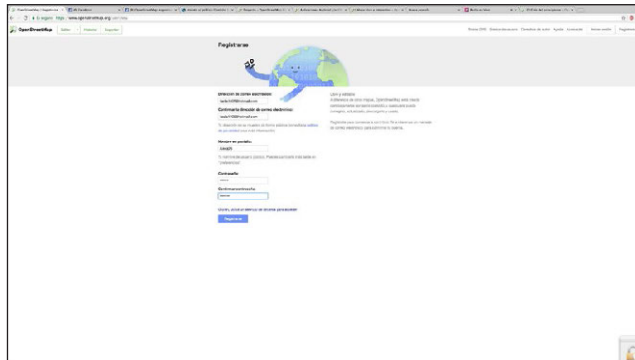


Figura 2. Registro en la plataforma de OSM.  
Fuente: Fuente: www.openstreetmap.org

Iniciada la sesión de trabajo en el editor ID, se visualizan los elementos geográficos que se pueden editar, siendo punto (una ubicación específica y descripción), línea (elementos caminos, vías férreas y ríos) y área (límites de elementos como lagos, edificios y áreas residenciales), cada uno de ellos maneja un catálogo específico con diversos atributos (ver tabla I) que se especifican cuando se coloca un elemento geográfico.

TABLA I  
Elementos geográficos y atributos

ELEMENTO	CATEGORÍAS	ATRIBUTOS Y/O SUBCATEGORÍAS
Punto	Cafetería	10
	Parque/ plaza	2
	Elementos naturales	4
	Hospitales	1
	Lugar de Culto	6
	Restaurante	9
	Comida rápida	11
	Bar	7
	Banco	7
	Supermercado	6
	Punto	3
Línea	Caminos	16
	Ferrocarriles	6
	Senderos	8
	Agua lineales	5
	De Barrera	5
	Línea de alta tensión	1
	Línea	2
Área	---	3

Fuente: Elaboración propia con base al Editor Id de OSM

Para ubicar espacialmente al elemento se cuenta con capas de mapas vectoriales (estándar, ciclista, transporte y humanitario) e imágenes de fondo que permita una mejor visualización y ubicación del elemento, esta información se personaliza al gusto del usuario.

En la edición de los elementos se puede optar que la misma sea con base a la información que se actualizará (puntos, líneas o áreas); una vez ubicado el lugar se realiza un acerca-

miento que permite identificar y puntualizar al elemento, con lo cual se despliegan las diferentes categorías que se le atribuyen, así como los atributos del mismo (ver figura 3).

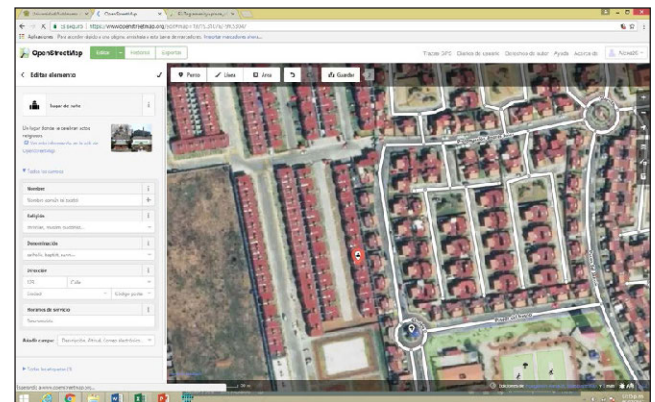


Figura 3. Categorías de atributos en el Editor Id de OSM.  
Fuente: www.openstreetmap.org

Es importante hacer mención, que por cada categoría existe una descripción conceptual de referencia, además ofrece más información a través del sitio de wiki de OpenStreetMap, que establece un concepto, como mapear el elemento y completar la descripción con diversas etiquetas.

Realizada la actualización del elemento-ediciones-, se requiere guardar el cambio, en este proceso se solicita adjuntar un comentario con la descripción de las contribuciones efectuadas, cuando se ha guardado se especifica que se subirán a la plataforma de OSM y serán visibles en todos los mapas que usen datos de esta plataforma.

Por su parte, Here Maps, se constituyó desde 2012 como una compañía dedicada a desarrollar el servicio de mapas y navegación, anteriormente se conocía como Nokia Maps y Ovi Maps, creándose en un principio para los teléfonos móviles y dispositivos multimedia de Nokia. (Nokia Map, 2011).

La cartografía a nivel mundial realizada por esta empresa, se basa en un modelo de actualización colaborativa por parte de la sociedad, el servicio de mapas es accesible para cualquier dispositivo móvil con Android y/o Windows

La colaboración a partir de la edición de los mapas en la plataforma se realiza a través de la herramienta de Map Creator (figura 4), incluye solo elementos geográficos como: líneas (vías de comunicación), puntuales (lugares) y números de las casas habitacionales y calles.

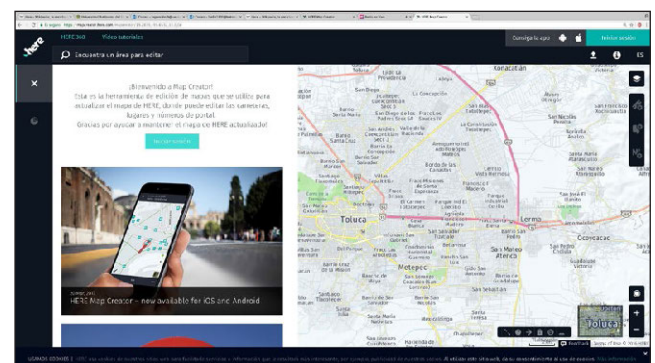


Figura 4. Página de inicio de la Plataforma Cartografía Participativa, HERE.  
Fuente: www.mapcreator.here.com

Para dar inicio la edición en la plataforma, se debe generar un registro del participante a través de un formulario (ver figura 5), que incluye los siguientes datos: nombre completo, correo electrónico, contraseña, fecha de nacimiento, país o región y una comprobación de seguridad, para el registro, aunado a la leyenda de aceptar las condiciones de servicio y las políticas de privacidad. Es necesario confirmar el registro mediante la cuenta de correo electrónico registrada para acceder y trabajar en la herramienta de Map Creator.

Figura 5. Formulario de registro en Map Creator, HERE.  
Fuente: www.mapcreator.here.com

Iniciada la sesión de trabajo, se realizan las ediciones de los elementos geográficos, que se consideren pertinentes a partir de una asignación por parte de Here a través de comunidades de participación, o de la iniciativa del participante por un lugar de interés personal o académico.

Los elementos geográficos que se pueden editar dentro de la plataforma están referidos en la Tabla II; se debe elegir el tipo de elemento a editar -lineales y/o puntuales- y cuando se ubica y se coloca dicho elemento se activan los diversos atributos que identifican al elemento.

**TABLA II**  
Elementos geográficos y atributos

ELEMENTO		SUBCATEGORÍAS	ATRIBUTOS
Lineales	Caminos	Tipo de camino	8
		Nombre del camino	6
Puntuales	Lugares	Alojamiento	10
		Áreas (parques) y edificios (zona industrial y de gobierno)	7
		Comercios y servicios	104
		Comer y beber	13
		Instalaciones de servicios	68
		Sitios de entretenimiento	17
		Sitios de esparcimientos al aire libre	24
		Sitios naturales y geográficos	2
		Compras	75
		Turismo y museos	21
		Transporte	41
	Números	Casas	1
		Calles	1

Fuente: Elaboración propia con base a la plataforma Map Creator

Para iniciar con la actualización -edición- de los elementos geográficos antes mencionados, se debe elegir el elemento lineal o puntual y realizar el zoom suficiente para poder identificar y colocar el elemento tomando como referencia las imágenes de satélite y la información vectorial precargada, cuando se ha digitalizado dicho elemento, se le añade los atributos y las observaciones correspondientes, establecidos para ello y en correspondencia con la tabla II.; se da las opciones de guardar, deshacer o cancelar la edición, como se puede observar en la figura 6.

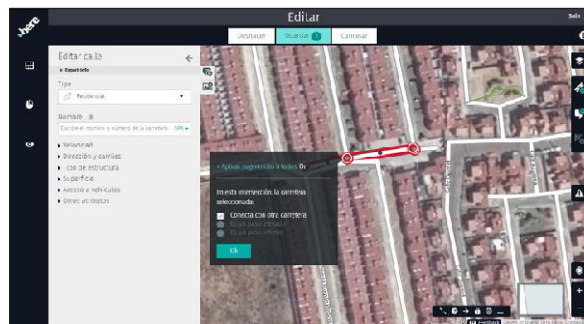


Figura 6. Edición de elementos geográficos en Map Creator  
Fuente: www.mapcreator.here.com.

Es importante mencionar, que se debe tomar como referencia y apoyo Mapa Digital del INEGI para la actualización de la información.

Al momento de guardar la edición de los datos generados, se almacena en los servidores remotos -en la nube-, éstos son revisados por los responsables de la actualización y comprobación de la calidad y veracidad de los datos. Este proceso puede tardar entre uno o dos meses para que Here de el visto bueno y se considere como un elemento geográfico actualizado y forme parte de la cartografía de la empresa.

Por otra parte, el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), es un organismo público autónomo, responsable de normar y coordinar el Sistema Nacional de Información Estadística y Geografía, así como de captar, procesar y difundir información de México en cuanto al territorio, los recursos la población y economía. (INEGI, 2017).

Esta Institución, inicia a nivel nacional el proyecto de Cartografía Participativa en 2016, teniendo como propósito la colaboración activa de la población a partir de la actualización permanente de la cartografía, ésta obedece a dos principales objetivos, por un lado, "a sumar esfuerzos de los diferentes sectores de la sociedad, y por otro, a las aportaciones de nuevos datos o señalando las diferencias que los ciudadanos identifiquen en el territorio". (INEGI, 2017).

Se inicia dicho proyecto, coadyuvando a enriquecer la información geográfica del país, para ser consultada en la Plataforma de Mapa Digital de México, considerándose a ésta como un Sistema de Información Geográfica (SIG), desarrollado por la misma institución, la cual integra información de los elementos naturales y culturales que conforman el entorno geográfico del país.

El proyecto de Cartografía Participativa permite contribuir con aportaciones para la actualización de rasgos geográficos, ubicándolos en el mapa base establecido para ello, (ver figura 7), seleccionado el elemento a reportar, el tipo de informe, describiendo el cambio detectado acompañado en lo posible con fotografías y documentos de apoyo, se envía para su revisión y posible incorporación a la Plataforma de Mapa Digital.

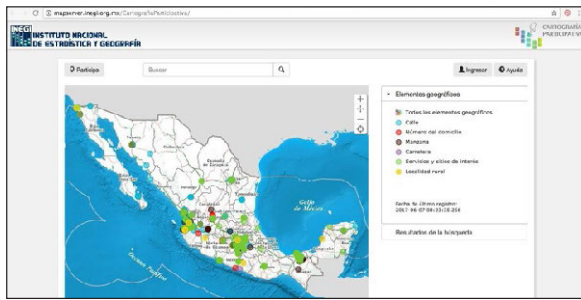


Figura 7. Página de inicio de la Plataforma de Cartografía Participativa, INEGI.

Fuente: <http://mapserver.inegi.org.mx/CartografíaParticipativa/>

Para contribuir con este proyecto cualquier individuo o la población en general, deberá iniciar con un registro (ver figura 8), el cual garantiza que los datos personales proporcionados estarán protegidos de acuerdo con el Sistema de Datos Personales denominado "Registro Único de Usuarios".

El registro solicita datos referentes a la información de la cuenta de correo electrónico; los datos personales como: nombre, país, entidad federativa (estado y municipio); información académica –escolaridad–; datos de ocupación –ocupación, institución–empresa, cargo–.

Iniciada la sesión de participación, se pueden visualizar los elementos geográficos que son actos de actualizar (ver figura 9), entre ellos se encuentran, calles; número del domicilio; manzanas; carreteras; servicios y sitios de interés; localidad rural. Cabe destacar que los datos que se registran son de forma de implantación puntual, sin embargo, existen elementos geográficos que en la realidad son lineales y de área. Es importante destacar esto, ya que solamente se colocarán puntos, aunque el elemento a actualizarse sea lineal o de área.

Figura 8. Registro en la plataforma de Cartografía Participativa, INEGI. <http://mapserver.inegi.org.mx/CartografíaParticipativa/>

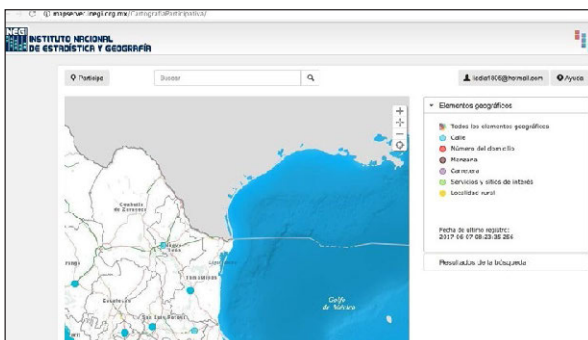


Figura 9. Edición de elementos geográficos.

Fuente: <http://mapserver.inegi.org.mx/CartografíaParticipativa/>

De la edición de los elementos geográficos antes mencionados, se pueden realizar diversos tipos de reporte (ver tabla III), de acuerdo con la información que se considera correcta y apta para su actualización.

TABLA III

Tipos de reportes generados a partir de elementos geográficos

ELEMENTO GEOGRÁFICO	TIPO DE REPORTE
Calles	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nombre incorrecto de la calle</li> <li>Incluir el nombre de la calle</li> <li>Borrar la calle</li> <li>Incluir la calle</li> <li>Cambiar el sentido de la calle</li> </ul>
Número del domicilio	<ul style="list-style-type: none"> <li>Número incorrecto del domicilio</li> <li>Incluir el número del domicilio</li> </ul>
Manzana	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incluir la manzana</li> <li>Borrar la Manzana</li> <li>Dividir la manzana</li> <li>Unir la manzana</li> </ul>
Carretera	<ul style="list-style-type: none"> <li>Número incorrecto de la carretera</li> <li>Incluir la carretera</li> </ul>
Servicios y sitios de interés	<ul style="list-style-type: none"> <li>Incluir servicios y sitios de interés</li> <li>Borrar servicios y sitios de interés</li> <li>Datos incorrectos del servicio y sitio de interés</li> </ul>
Localidades rurales	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nombre incorrecto de la localidad rural</li> <li>Incorporar la localidad rural</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia con base a la plataforma de cartografía participativa de INEGI.

Para iniciar con una contribución –edición–, se tiene que realizar un acercamiento a la zona que tendrá efecto la modificación y/o actualización, ya que inicialmente se despliega el mapa de la República Mexicana. Una vez encontrado el lugar se posiciona sobre él y se da clic en el botón “Participar”.

Se despliega una nueva ventana donde indica las coordenadas geográficas en la que se sitúa el elemento, además de seleccionar el elemento geográfico y el tipo de reporte, de acuerdo con la tabla III, asimismo, se debe incluir la descripción de cambio que se pretende actualizar y anexar la información complementaria como fotografía y/o documentos de apoyo (ver figura 10).

Figura 10. Reporte de ediciones de elementos geográficos. <http://mapserver.inegi.org.mx/CartografíaParticipativa/>

Cuando se envía el reporte o informe, se le asigna un número de registro –folio–, en el cual se indica que se le dará seguimiento a la participación realizada. El elemento situado como actualizaciones anexa una ficha técnica en cual incluye el folio, el tipo y fecha de registro (ver figura 11).

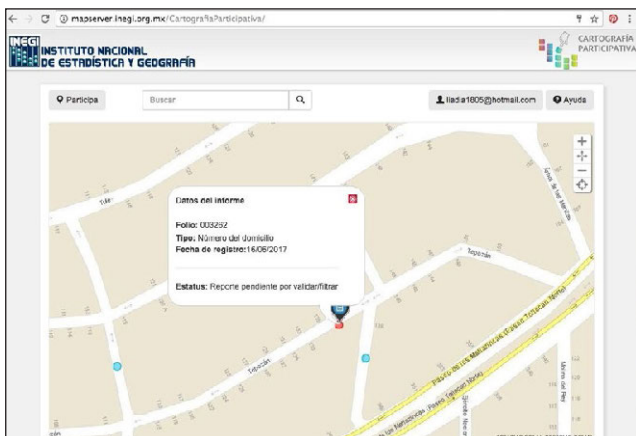


Figura. 11. Incorporación de elementos geográficos.  
<http://mapservier.inegi.org.mx/CartografiaParticipativa/>

Cuando se ha realizado la contribución de la actualización de cualquier elemento geográfico, los encargados de la plataforma de cartografía participativa, se dan a la tarea de revisar la información que se pretende actualizar, teniendo para ello diversas herramientas de apoyo, como las imágenes de satélite, Google Earth –extensión de Street View-, Mapa Digital, si no existiera dicha información en las plataformas antes mencionadas, se envía a una brigada de campo a verificar y levantar el dato correspondiente. Es importante aclarar, que el proceso de validación de la información se puede tardar varios meses, ya que se deberá tener correctamente dicha información.

Comprobado la veracidad de la información, se determina incorporar dicha actualización a la plataforma de Mapa Digital para ser consultada por cualquier ciudadano.

Para la asignatura de MRC, es imprescindible que los alumnos conozcan, analicen y se apropien de la conceptualización y representación de las formas de implantación (puntual, lineal y de área) y como esta información espacial se representa en un ámbito digital, abierto de apoyo a la actualización cartográfica participativa.

## II.2 VINCULACIÓN INSTITUCIONAL CON LAS ORGANIZACIONES QUE REPRESENTAN A DICHAS PLATAFORMAS

La generación de alianzas entre las universidades y los diversos sectores productivos, constituye un eje primordial en la formación de cualquier profesional, pues este tipo de acciones permiten validar en la práctica el diseño curricular de todo programa educativo, además de la posibilidad de la realización del servicio social, estancias, favorecer la inserción laboral, entre otros beneficios.

Tal y como lo mencionan Alonzo et al (2007) “Si bien la misión de las Instituciones de Educación Superior (IES) y de las empresas son diferentes, existen puntos de convergencia entre ambas que implican una colaboración mutua que tenga como resultado la satisfacción de necesidades de las dos partes.”

Para el caso específico de las organizaciones y/o instituciones que se consideraron por su plataforma de CP, y que fueron descritas en la sección anterior, se han llevado a cabo una serie de actividades que han permitido estrechar los lazos de colaboración en la Facultad de Geografía de la UAEMéx con las mismas.

En el caso del INEGI se tiene un convenio de colaboración general que involucra no sólo a la Facultad de Geografía,

sino también a Ciencias y Planeación Urbana y Regional. Los puntos específicos de dicho convenio sólo cubren los rubros correspondientes al apoyo para donación, préstamo y adquisición de acervo cartográfico; no obstante, se llevó a cabo un ejercicio de colaboración que funcionó como antecedente al proyecto motivo de este trabajo, el cual consistió en que a través de la asignatura de Prácticas Profesionales, los estudiantes tuvieron oportunidad de integrarse al plan piloto de cartografía participativa de dicha institución. Como parte del seguimiento y evaluación de dicha asignatura, se pudo corroborar el potencial desde el punto de vista académico que este tipo de plataformas y herramientas representan para la práctica docente, desde los periodos iniciales.

Con base en lo anterior, se llevaron a cabo las gestiones con la comunidad OpenStreetMap México (OSM-Mx), que derivaron en la organización de la 1ª. Jornada de Mapeo Libre, en el campus CU de la UAEMéx (Figura 12), en Toluca, Estado de México (OSM, 2016).



Figura. 12. Representantes de la comunidad OSM-Mx dando apertura al evento.

Con este evento se logró tener “un buen cruce entre las enseñanzas técnicas con el uso de aplicaciones web y de campo, un panorama de distintas maneras de colaborar con Openstreetmap”, (OSM-Mx, 2016). A lo largo de dos días los asistentes (estudiantes, profesores y público en general) participaron en el aprendizaje de la herramienta de edición (figura 13), así como de las aplicaciones móviles para recorridos y fotomapeo (figura 14).

Con la empresa Here Maps el tipo de vinculación se realizó a través del establecimiento de lo que esta empresa denomina como “Comunidades de expertos”. Este esquema permite realizar la CP a través del monitoreo por parte de un profesor responsable en la IES, y por otra, el responsable local del departamento Communities & Ecosystem de Here. Durante un periodo escolar en particular, y dentro de una asignatura, se determinan áreas específicas de mapeo, con una meta de ediciones, y con las cuales el profesor responsable establece si son parte de la evaluación del curso, o se consideran como opción del número de horas y actividades a desempeñar dentro de la prestación de servicio social o prácticas profesionales.

Durante dos periodos consecutivos, se ha llevado esta actividad en este organismo académico, siendo en uno de ellos donde se implementó este proyecto. Esto también ha permitido que los estudiantes se vinculen con otras comunidades de apoyo a mapeo de zonas; aunado a lo anterior, y con base a los resultados obtenidos en el número de ediciones por parte de los estudiantes, la empresa Here hizo la invitación para que la Facultad fuera la sede del 1er. Mapatón Here México (figura 15).



Figura. 13. Capacitación en el uso del Editor ID de Openstreetmap



Figura. 14. Trabajo de campo y fotomapeo con apoyo de aplicaciones móviles.



Figura. 15. Mapatón Here México (Here, 2017).

**II.3 DEFINICIÓN DE LOS ELEMENTOS COMPARATIVOS**

El análisis comparativo permite determinar las diferencias y similitudes de un producto o proceso, de acuerdo con una serie de criterios que, para este caso, proporcionen los elementos más adecuados de aprendizaje de los temas cartográficos y su forma de representación. Adicionalmente, se consideraron también aquellos que lleven a la inducción de las asignaturas de los periodos posteriores, relacionados con el diseño, estructuración e integración de bases de datos.

La tabla IV muestra los elementos o parámetros principales en la evaluación de las plataformas, con una descripción de los mismos.

**TABLA IV**  
Parámetros para el análisis comparativo de las plataformas de CP.

PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN
Registro a la plataforma	Facilidad de acceso y creación de cuenta de usuario
Edición de entidades	Diversidad de elementos geográficos y facilidad de modificación de los mismos
Conjunto de datos	Catálogo de atributos y dominios para identificar los elementos geográficos
Aceptación de aportaciones	Proceso de validación de captura y el tiempo en que el usuario que aporta datos puede visualizar cada una de sus ediciones, así como el conteo y estadística personal.
Apertura de datos	Disponibilidad de datos en formatos abiertos y las restricciones correspondientes
Aplicaciones para trabajo de campo	Funcionamiento del editor, en versión para dispositivos móviles
Fotomapeo	Integración de herramientas para integrar fotografías georreferenciadas
Documentación	Información disponible que permita ampliar los conceptos de cada plataforma, o bien para la resolución de dudas.

Fuente: Elaboración propia

**II.4 INTEGRACIÓN DE LAS PLATAFORMAS COMO RECURSO DIDÁCTICO DEL PROGRAMA DE CLASE DE LA ASIGNATURA**

La enseñanza de la cartografía, en particular en la asignatura de Métodos de Representación Cartográfica (MRC) de la Licenciatura en Geoinformática, se enfoca y enfatiza en la representación de las diversas formas de implantación siendo éstas puntual, lineal y de área de los diversos elementos geográficos de la superficie terrestre (UAEMEX, 2016).

Entendiéndose a las formas de implantación gráfica, como la forma de representar los signos y símbolos y el posicionamiento que tengan los hechos y fenómenos geográficos en el espacio geográfico. (Gómez, 2014).

El principal resultado obtenido en MRC fue la elaboración de mapas temáticos de carácter físico y/o socioeconómico, utilizando para ello la base cartográfica, la temática a representar a partir de un objetivo, variables visuales, la simbolización y por supuesto el proceso de generalización.

La generación de un mapa temático con un fin específico se torna compleja de comprender, ya que no sólo implica la representación, sino que además es necesario que los elementos a mapear sean correctamente determinados, de acuerdo al elemento geográfico, y la interpretación y lectura que cualquier usuario debe de hacer del mapa.

Por esta razón se vio la necesidad de incorporar diversas plataformas que apoyaron al entendimiento y apropiación de los conceptos y la generación de los MRC a partir de la participación colaborativa -cartografía participativa-. Para corroborar esta actividad se realizó un ejercicio de verificación en campo de los elementos que en gabinete (plataformas de edición) se determinaron, a través de una salida académica al municipio de Calvillo, Aguascalientes; de igual forma, se llevaron a cabo salidas a sitios locales en el municipio de Toluca, donde se encuentra el campus universitario, específicamente para las

actividades de fotomapeo (figura 16), que se ha convertido en una estrategia didáctica para complementar los temas cartográficos al “generar bancos de fotografías georeferenciadas para ilustrar el entorno” (Jacquin, 2017).

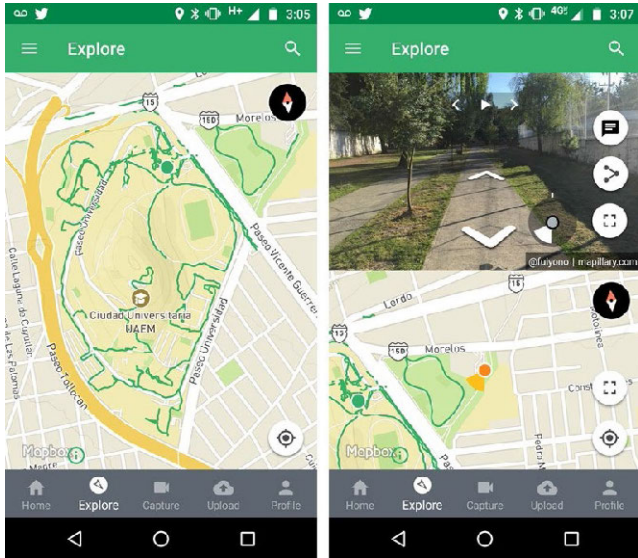


Figura 16. Mapillary: aplicación de fotomapeo a nivel de calle

### III. RESULTADOS

El análisis comparativo realizado, se basó en la posibilidad de contar con elementos para su utilización con fines académicos, como se muestra en la tabla VI.

PARÁMETRO	OSM	HERE	INEGI
Registro a la plataforma	✓✓✓	✓✓✓	✓✓✓
Edición de entidades	✓✓✓	✓✓	✓
Conjunto de datos	✓✓✓	✓✓	✓
Aceptación de aportaciones	✓✓✓	✓✓✓	✓
Apertura de datos	✓✓✓	✓✓	
Aplicaciones para trabajo de campo	✓✓✓	✓✓	✓
Fotomapeo	✓✓✓	✓✓✓	
Documentación	✓✓✓	✓✓	

TABLA VI: Resultados del análisis comparativo de las plataformas de CP

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a todo lo anterior y a partir del análisis de las tres plataformas, dos de estas carecen de representación de todos los elementos geográficos (HERE e INEGI); las categorías y/o etiquetas son desiguales en todas, ya que se presenta más detalle en algunas y otras carecen de detalle para poder actualizar y representar la información; si bien el apoyo de fondo (imágenes de satélite e información vectorial) existe en las tres, sólo en una de ellas (OSM), existe variedad de visualización y detalle para identificar perfectamente el elemento. Aunado a esto, la información generada en las plataformas solo es de consulta y visualización para el usuario en HERE e INEGI, ya que específicamente para el caso de HERE el usuario que colabora puede acceder a los datos siempre y cuando haya un convenio de por medio entre la IES y la empresa, teniendo como límite un máximo de diez mil transacciones; mientras que en OSM se puede acceder a la información y descargar en diversos formatos entre ellos SHP, y así el usuario tiene la posibilidad de generar su propia cartografía.

### IV. CONCLUSIONES

La dinámica del trabajo permitió a los estudiantes llevar a cabo una comparación e identificación de la plataforma más adecuada, considerando el manejo de los elementos geográficos y su representación a partir de la edición de los mismos.

La realización de un número considerable de ediciones por parte de los alumnos en las tres plataformas les brindó la oportunidad de comprender, por un lado, la representación tan diversa de diferentes fenómenos a partir de las formas de implantación, y, por otro lado, cómo se caracterizan éstas con diferentes atributos, aunado a las diferentes escalas de trabajo de acuerdo con el lugar asignado, especialmente en la actividad desarrollada en el Mapatón de Here (figura 17).

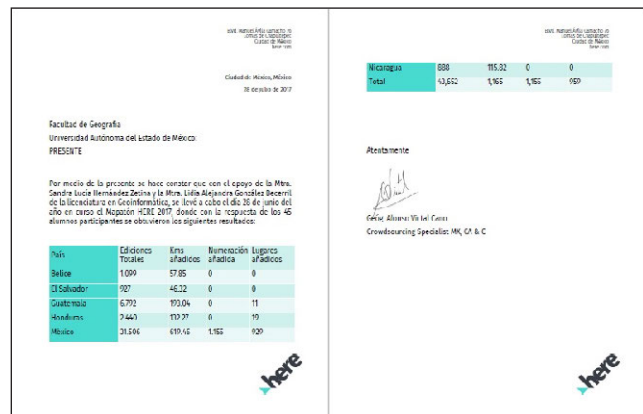


Figura 17. Ediciones alcanzadas en el Mapatón Here

De las plataformas analizadas, Map Creator y el Editor Id de OSM se presentan como opciones viables para ser usadas como recursos didácticos dentro de la enseñanza de la cartografía; sin embargo, cabe señalar que la plataforma de OSM integra características ideales para dar continuidad en el desarrollo de los temas no solamente cartográficos, sino que también permite introducir al estudiante en la estructuración de bases de datos y las consultas asociadas tanto de datos alfanuméricos como espaciales.

Siendo los datos geoespaciales el objeto de estudio del Licenciado en Geoinformática, es necesario que desde los primeros periodos de formación tenga un acercamiento con todas aquellas herramientas que le permitan conocer no sólo el funcionamiento de las mismas para la adquisición de dichos datos, sino también las geotecnologías asociadas, las políticas de uso, las posibilidades relacionadas con la determinación del alcance de un proyecto e incluso, el acercamiento a todas aquellas organizaciones que le permitan tener una participación activa en el desarrollo de su perfil profesional.



### AGRADECIMIENTOS

Nuestro más profundo agradecimiento a Miriam González de la comunidad OSM-Mx, y a Alonso Victal de Here Maps, por todas las facilidades brindadas y el apoyo obtenido en los diversos eventos.

De igual forma, un reconocimiento especial a los estudiantes de las generaciones 2014, 2015 y 2016 de la Licenciatura en Geoinformática, que colaboraron con el proyecto y con su valiosa participación de las diferentes actividades académicas.

### REFERENCIAS

- Alonzo, R. D., Cú B., G., Aragón N., F. (2007). La vinculación universidad sector productivo. *Quaderns Digitals* No. 48. Recuperado de [http://www.quadernsdigitals.net/index.php?accionMenu=hemeroteca.VisualizaArticuloIU.visualiza&articulo\\_id=10212](http://www.quadernsdigitals.net/index.php?accionMenu=hemeroteca.VisualizaArticuloIU.visualiza&articulo_id=10212)
- Buzai, Gustavo (2014). Geografía Global + NeoGeografía. Actuales espacios de integración científica y social en entornos digitales. *Estudios Socioterritoriales. Revista de Geografía*. N° 16, vol. 2, jul-dic 2014, pág. 13-24. Recuperado de: <http://www.scielo.org.ar/pdf/esso/v16s1/v16s1a02.pdf>.
- Franco Maass S. y Valdez Pérez M. E. (2003). *Principios Básicos de Cartografía y Cartografía Automatizada*. Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM). Toluca, Estado de México, México.
- Gómez Escobar María del Consuelo. (2004). *Métodos y técnicas de la cartografía temática*. Instituto de Geografía, UNAM. México, D.F.
- Here. (2017, junio 30). Mapatón UAEMéx. [Actualización de estado de Facebook]. Recuperado de <https://www.facebook.com/media/set/?set=oa.1917983318425759&type=1>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI. (2017). *Cartografía participativa*. Consultado el 6 de junio de 2017 y recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/cartografiaparticipativa/default.aspx>
- Jacquine, C. (2017). El rol del fotomapping para el diagnóstico y evaluación enfocada al desarrollo. Abierto al público, Blog del Banco Interamericano de Desarrollo. Consultado el 17 de mayo de 2017 y recuperado de <https://blogs.iadb.org/abierto-al-publico/2017/01/26/rol-del-fotomapping-diagnostico-la-evaluacion-enfocada-al-desarrollo/>
- Nokia Maps on Series 40 (2011). *Nokia Conversations Blog*. Nokia. [http://www.nokia.com/es\\_int](http://www.nokia.com/es_int) . Consultado el 20 de junio 2017.
- UAEMEX. (2006). *Plan de estudios de la Licenciatura en Geoinformática*. Facultad de Geografía. Consultado el 20 de junio de 2017 y recuperado de [http://facgeografia.uaemex.mx/fg/docs/Plan\\_Geoinfo.pdf](http://facgeografia.uaemex.mx/fg/docs/Plan_Geoinfo.pdf)
- Wiki-OSM (2016, December 5). *OpenStreetMap Wiki*. Consultado el 6 de julio de 2017 y recuperado de [http://wiki.openstreetmap.org/w/index.php?title=ES:Tag:amenity%3Dplace\\_of\\_worship&oldid=1403521](http://wiki.openstreetmap.org/w/index.php?title=ES:Tag:amenity%3Dplace_of_worship&oldid=1403521).



# Experiencia de la instrucción de los cursos de bases de datos para la maestría profesional en sistemas de información geográfica y teledetección del programa interuniversitario de la Universidad de Costa Rica y la Universidad Nacional de Costa Rica

Viquez Viquez Andrés<sup>1</sup>, Hernández Ruiz Irene<sup>2</sup>

1 Escuela de Ingeniería Computación / Instituto Tecnológico de Costa Rica  
Desamparados de Alajuela, Sede Interuniversitaria de Alajuela, Alajuela, Costa Rica  
anviquez@itcr.ac.cr

2 Escuela de Informática / Facultad de Ciencias Exactas y Naturales / Universidad Nacional de Costa Rica  
Lagunilla de Heredia, Campus Benjamín Núñez, Heredia, Costa Rica  
irene.hernandez.ruiz@una.cr

## RESUMEN

El presente trabajo da a conocer la experiencia académica al diseñar e impartir los cursos de Diseño y Explotación de Bases de Datos e Implementación de Bases de Datos Geográficas para la Maestría Profesional en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, dando a conocer los principales temas de los cursos y su forma de abordaje, presentando los recursos de software utilizados, con el fin de que la comunidad académica y público en general los conozcan y puedan utilizarlos en la formación de profesionales en estas disciplinas.

Palabras clave: **sistemas de información geográfica, bases de datos, software SIG, software libre.**

## ABSTRACT

*The current work presents the academic experience to design and teach the courses of Design and Explotation of Databases and Implementation of Geographical Databases for the Professional Master's Degree in Geographic Information Systems and Remote Sensing, announcing the main topics of the courses and their approach, presenting the software resources used it, so that the academic community and general public know them and can use them in the training of professionals in these disciplines.*

**Keywords: geographic information systems, databases, GIS software, open source software.**

## I. INTRODUCCIÓN

La evolución de los sistemas de información geográfica ha sido bastante notable desde sus orígenes hasta nuestros días. Se han transformado de ser una mera combinación de elementos de cartografía cuantitativa, un territorio muy propio de geógrafos y cartógrafos, a conformar plataformas cada vez más robustas, adaptables y particularizadas a necesidades de un sin número de disciplinas. A pesar de su acelerado desarrollo, sus componentes principales se han mantenido a través del tiempo, evolucionando e influenciando el rumbo del SIG, a lo que distinguimos los siguientes elementos (Olaya, 2016):

- La evolución del SIG como disciplina: concibe cómo ha cambiado la presencia social de los SIG, así como su relación con otras disciplinas científicas, tanto influenciándolas como siendo influenciadas por ellas.
- La evolución de la tecnología: concibe cómo ha variado el software SIG, así como los ordenadores, periféricos y otros elementos informáticos de los que depende su funcionamiento.
- La evolución de los datos: concibe cómo ha cambiado la generación y representación de los datos, su almacenamiento y administración.
- La evolución de las técnicas y formulaciones: concibe cómo se han desarrollado nuevos conceptos, enfoques, teorías o ramas de conocimiento.

De los anteriores, los datos vienen a ser el elemento principal del trabajo dentro de un SIG, a lo que se estima que alrededor del 80% de los datos que son almacenados en las bases de datos de las organizaciones tienen un componente espacial (Malinowski & Zimányi, 2010), y a pesar de que en el pasado era muy común que los sistemas de información concibieran la representación de un dato espacial como un campo alfanumérico, con el paso del tiempo se ha comprendido que este modelamiento de forma no espacial limita las capacidades de análisis y descubrimiento de patrones.

Los altos volúmenes de datos espaciales que gestionan las organizaciones y todas sus posibles aplicaciones para la toma de decisiones estratégicas, han forzado a los distintos profesionales a cargo a especializar sus conocimientos, habilidades y metodologías de trabajo en una nueva área de ciencias de la información geográfica.

Costa Rica a pesar de que fue el primer país en la región centroamericana en instaurar el uso de los sistemas de información geográfica en el ámbito universitario, replicando posteriormente esta tendencia en diferentes instituciones gubernamentales, no había podido crear un espacio continuo donde la academia y la industria pudieran compartir sus experiencias, por lo que en el año 2008 como una propuesta a esta necesidad, la Escuela de Ciencias Geográficas de la Universidad Nacional (UNA) y la Escuela de Geografía de la Universidad de Costa Rica (UCR) establecieron un programa de posgrado interuniversitario (Solano Mayorga, Moraga Peralta & Cedeño Montoya, 2010).

El programa invita a profesionales pertenecientes a disciplinas de topografía, ingeniería civil, geología, biología, agronomía, ingeniería forestal, ingeniería en computación y geografía a especializarse en métodos y técnicas esenciales de disciplinas como la cartografía, la fotogrametría, la geodesia, la teledetección, los sistemas de posicionamiento global, geoestadística e informática, todas estas vinculadas a la temática de los sistemas de información geográfica (Pro-

grama de Maestría en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección Escuela de Ciencias Geográficas, 2010). La malla curricular del programa enfatiza en los aspectos teóricos, prácticos y metodológicos de los siguientes ejes temáticos (Programa de Maestría en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección Escuela de Ciencias Geográficas, 2010):

- Cartografía y SIG
- Teledetección
- Bases de datos
- Programación de aplicaciones SIG
- Análisis espacial

El programa de posgrado consiste en una maestría profesional, lo que significa que se profundiza y actualiza el conocimiento, con el propósito de analizarlo, sintetizarlo, transmitirlo y solucionar problemas. Esto implica un reto para el docente, utilizar una metodología de enseñanza aprendizaje que le permita al estudiante aplicar sus conocimientos en su campo profesional.

Para lograr este objetivo se propone el aprendizaje basado en problemas (ABP), donde lo fundamental está en los ambientes de aprendizaje creados desde situaciones problemáticas pertinentes y significativas para los estudiantes (Reigeluth, 2000).

Durante la solución del problema los estudiantes están aprendiendo los contenidos programados y luego desde la solución final, los estudiantes vuelven sobre lo aprendido, tanto acerca del ámbito del problema mismo, como del método de solución (Parra, Castro & Amariles, 2014).

También con respecto a la relación entre el ABP y los problemas plantean que los problemas deben ser no estructurados y motivar la libre indagación de los estudiantes (De Graaf & Kolmos, 2003), asimismo deben promover actitudes de colaboración como parte de la metodología. Al respecto, es de anotarse que el trabajo en equipo con criterio colaborativo es pieza fundamental del ABP. De esta forma, se destaca que la metodología es interactiva, centrada en el estudiante, organizado para trabajar en grupos pequeños, y metódicamente orientada por el profesor.

Este artículo presenta la experiencia de tres años de impartir los cursos del eje temático de bases de datos en el programa, los tópicos que se estudian, la forma en que se han abordado, las herramientas de software de apoyo utilizadas y los resultados obtenidos a la fecha.

## II. MÉTODO

El eje temático de bases de datos del programa está diseñado para brindar al estudiante los conocimientos básicos de los sistemas gestores de bases de datos que le permitan aprender a diseñar, implementar y explotar las bases de datos, contenidos que son usuales dentro de una malla curricular del área de ciencias de la computación e informática, no obstante al ser la población de estudiantes pertenecientes a la carrera de geografía y disciplinas afines, así como la referencia espacial un elemento sobresaliente en la temática, ha implicado un abordaje distinto al que tradicionalmente se utiliza para estudiantes de carreras de computación e informática.

Los estudiantes inician en el segundo ciclo lectivo del programa el curso de Diseño y Explotación de Bases Datos. Este curso brinda los conocimientos básicos sobre los sistemas gestores de bases de datos (SGBD) y el modelamiento de bases de datos, que permiten a los estudiantes diseñar e implementar

soluciones a problemas que involucren datos tabulares, espaciales o modelos mixtos. El diseño se realiza a nivel conceptual asegurando la representación de los requerimientos de la aplicación independientemente del software utilizado para su implementación. El diseño se formaliza por medio del modelo entidad-relación y considerando las características de las bases de datos, se usan las reglas que permiten transformar el diseño conceptual al diseño lógico e implementar una base de datos en un SGBD. Es un curso teórico-práctico en donde el estudiante analiza diferentes modelos de estructuras de bases de datos, apoyados en el lenguaje de consulta estructurada (SQL). Los contenidos del curso se presentan en la tabla I:

**TABLA I**  
Contenidos del curso diseño y explotación de bases de datos

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bases de datos y su relación con los sistemas de información geográfica.</li> <li>• Avances y tecnologías relacionadas al manejo de la información espacial.</li> </ul>
<b>2. FUNDAMENTOS DE BASES DE DATOS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Principios de sistemas gestores de bases de datos.</li> <li>• Arquitectura y evolución de los sistemas de bases de datos.</li> <li>• Niveles externo, conceptual e interno de una base de datos.</li> <li>• Ciclo de vida de una base de datos.</li> </ul>
<b>3. MODELIZACIÓN DE BASES DE DATOS</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Etapas del diseño de una base de datos.</li> <li>• Introducción a la ingeniería de requerimientos.</li> <li>• Diseño conceptual de bases de datos utilizando los modelos Entidad-Relación (ER) y ER extendido (EER).</li> <li>• Diseño lógico de bases de datos utilizando el modelo relacional.</li> <li>• Transformación de diagramas EER en esquemas relacionales.</li> <li>• Guías informales de buen diseño.</li> <li>• Proceso de normalización para asegurar diseños de alta calidad: dependencias funcionales, llaves, formas normales, descomposición.</li> </ul>
<b>4. LENGUAJE ESTRUCTURADO DE CONSULTAS (SQL)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Definición del esquema de la base de datos.</li> <li>• Diferentes tipos de datos convencionales y espaciales.</li> <li>• Inclusión de restricciones a nivel de la definición de tabla.</li> <li>• Consultas de datos simples y agregados.</li> <li>• Conversión de datos, expresiones y funciones.</li> <li>• Combinación de consultas y subconsultas.</li> </ul>

Una vez finalizado y aprobado el curso, el estudiante continúa su formación en el curso de Implementación de Bases de Datos Geográficas, donde profundiza en las técnicas, herramientas y procedimientos necesarios para la implementación, explotación y gestión de bases de datos espaciales. Al igual que el curso anterior, este es un curso teórico-práctico donde el estudiante desarrolla sus habilidades en el diseño e implementación de bases de datos de tipo espacial, que le permitirá ser capaz de implementar una infraestructura de datos espaciales de pequeña escala que facilite la colaboración entre los usuarios y compartir información. Los contenidos del curso se presentan en la tabla II:

**TABLA II**  
Contenidos del curso implementación de bases de datos geográficas

<b>1. PROGRAMACIÓN AVANZADA CON SQL.</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ejecución, captura y modificación de datos.</li> <li>• Transacciones, bloqueos e interbloqueos.</li> <li>• Tablas, índices y vistas.</li> <li>• Procedimientos almacenados.</li> <li>• Funciones definidas por el usuario.</li> <li>• Disparadores.</li> </ul>

<b>2. FUNDAMENTOS DE BASES DE DATOS.</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Qué es una base de datos espacial?</li> <li>• Definición y clasificación de los datos espaciales.</li> <li>• Importar y exportar datos espaciales.</li> <li>• Manipulaciones, relaciones y operaciones de datos espaciales.</li> <li>• Importancia de los índices espaciales.</li> <li>• Programación SQL aplicada a datos espaciales.</li> </ul>
<b>3. FLUJOS DE TRABAJO EN BASES DE DATOS MULTIUSUARIO.</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Seleccionando un ambiente de edición multiusuario.</li> <li>• Editando datos de forma no versionada.</li> <li>• Editando datos de forma versionada.</li> <li>• Configuración e inicialización del repositorio.</li> <li>• Creación y organización de versiones.</li> <li>• Detección e integración de cambios.</li> <li>• Administración de conflictos.</li> </ul>
<b>4. BASES DE DATOS Y SERVIDORES DE MAPAS EN LA WEB.</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introducción a las IDE (infraestructura de datos espaciales)</li> <li>• Estándares abiertos e interoperables de la OGC (Open Geospatial Consortium)</li> <li>• Introducción a la arquitectura cliente - servidor.</li> <li>• Servidores de mapas y su relación con las bases de datos.</li> <li>• Publicación de capas y servicios en la web (WMS, WFS, WCS y WPS).</li> <li>• Creación de mapas en caché.</li> </ul>
<b>5. PRINCIPIOS Y ARQUITECTURA DE BASES DE DATOS EN LA NUBE.</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Introducción a la computación en la nube.</li> <li>• Arquitectura en la nube.</li> <li>• Ventajas y desventajas de los servicios en la nube.</li> <li>• Publicación de servicios en la nube.</li> </ul>

Los cursos se imparten de forma cíclica cada dos años en el programa y cada uno consta de diecisiete semanas de duración, donde el estudiante dedica en promedio cuatro horas por semana en clases magistrales presenciales y cuatro horas de estudio independiente.

Para el desarrollo de estos cursos se ha decidido utilizar un proceso de enseñanza más dinámico, que combine diversos enfoques que se complementan entre sí, procurando maximizar un rol activo por parte del estudiante. Por ejemplo, para aprovechar las clases magistrales, se aplica un enfoque pedagógico de aprender haciendo (learning by doing), que consiste en un modelo en que el estudiante construye su conocimiento a partir de lo que hace (Sáez & Ruiz, 2012). La estrategia aplicada en cada lección para apoyar este enfoque pedagógico consiste en:

1. El profesor imparte el contenido teórico apoyándose en el material didáctico preparado para cada tema.
2. El profesor desarrolla en conjunto con los estudiantes un laboratorio (caso de estudio) guiado, donde el estudiante aplica de forma práctica el tema desarrollado.
3. Los estudiantes preparan un reporte de laboratorio con todos los pasos llevados a cabo y su experiencia del proceso.
4. El profesor asigna una tarea para cada tema que los estudiantes desarrollarán fuera de clase.

Las tareas y los laboratorios tienen el propósito que los estudiantes practiquen los conceptos vistos en clase y se preparen para la elaboración del proyecto del curso. El proyecto del curso por su parte tiene como objetivo que el estudiante resuelva un problema real práctico a partir de un caso de estudio propuesto por ellos mismos, de manera que les permita la aplicación y profundización de los conocimientos adquiridos

en el curso. El proyecto está diseñado para fomentar el ABP. El proyecto es continuo entre ambos cursos, lo que implica que el estudiante debe aprobar el primer curso de bases de datos para poder continuar con el segundo. Asimismo, como apoyo a las clases presenciales, se refuerzan temas con lecturas o artículos adicionales, que le permiten al estudiante profundizar en determinadas temáticas, que son evaluadas por medio de pruebas cortas de comprobación de lectura. En la tabla III se procede a detallar los rubros de evaluación y porcentajes aplicados para ambos cursos.

**TABLA III**  
Evaluación de los cursos

RUBRO	PORCENTAJE
Pruebas cortas y tareas	30%
Laboratorios	20%
Proyecto	50%
Total	100%

El desarrollo de las lecciones es apoyado con la herramienta del Aula Virtual Institucional que se basa en la plataforma Moodle. Esta plataforma, basada en software libre, permite a las instituciones educativas crear ambientes de aprendizaje personalizados (Docs.moodle.org, 2017), donde específicamente ha apoyado el desarrollo de los cursos al permitir crear foros de consultas de los estudiantes, crear un repositorio de materiales donde los estudiantes pueden descargar por semana el material visto en clase y permitir a los estudiantes enviar los diferentes entregables para su respectiva revisión. En la figura 1, se presenta una ilustración del Aula Virtual Institucional.

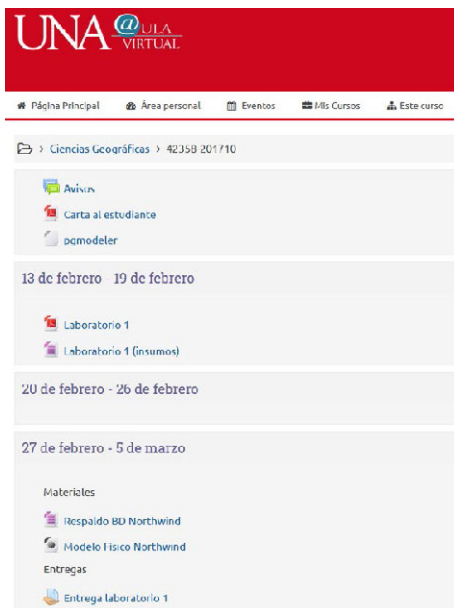


Figura 1. Aula Virtual Institucional.

El desarrollo de cada unidad temática es apoyada con diferentes herramientas de software, que le permiten al estudiante tener una visión práctica de los conceptos relacionados a las bases de datos, donde no se pretende profundizar en aspectos particulares de las herramientas de software, sino que el software se convierte en un instrumento para mejorar el entendimiento de los contenidos de los cursos. Las herramientas utilizadas en los cursos en su mayoría son basadas en software libre, licenciadas bajo el modelo de Licencia Pública General de GNU, esto quiere decir que cumple los siguientes cuatro principios (Gnu.org, 2017):

- Libertad 0: libertad de utilizar el programa para cualquier propósito.
- Libertad 1: libertad de estudiar el funcionamiento del programa y de modificarlo, con el fin de adaptarse a las necesidades.
- Libertad 2: libertad de distribuir el programa a otros sin restricciones.
- Libertad 3: libertad de mejorar el programa y hacer públicas estas mejoras, beneficiando a otros.

La razón en desarrollar las unidades temáticas de estos cursos principalmente utilizando software libre, es demostrar a los estudiantes que los proyectos basados en software libre pueden tener un alcance igual o superior a los proyectos basados en software comercial, que existe toda una comunidad de usuarios y empresas que soportan estas iniciativas y por el alto impacto de estas soluciones para el desarrollo de las ciudades emergentes en Latinoamérica, el software no debe ser limitante ni exclusivo a una minoría. El software que los estudiantes utilizan durante el curso se describe a continuación en la tabla IV.

**TABLA IV**  
Software ordenado por relevancia en el desarrollo de los contenidos de los cursos

#	SOFTWARE UTILIZADO	TIPO	LICENCIA
1	PostgreSQL / PostGIS.	Sistema gestor de bases de datos	Libre
2	QGIS.	Software de escritorio SIG	Libre
3	PgModeler.	Modelador de bases de datos	Libre
4	Microsoft SQL Server.	Sistema gestor de bases de datos	Propietaria
5	Geoserver.	Servidor de mapas web	Libre
6	ArcGIS.	Software de escritorio SIG	Propietaria

### III. RESULTADOS

Estos cursos se han impartido para tres promociones del programa, logrando llegar a una población de 53 estudiantes, pertenecientes a disciplinas de topografía, ingeniería civil, agronomía, ingeniería forestal, ingeniería en computación y geografía, siendo esta última su mayor foco. La distribución de la población abarca estudiantes que van desde los 25 años hasta los 54 años, de los cuales 37 son hombres y 16 mujeres, alcanzando una aprobación del 96,23%.

Los temas desarrollados por los estudiantes han permitido crear y fortalecer un vínculo academia - industria, pues han sido casos reales en instituciones, que en ocasiones se han utilizado para el desarrollo de trabajos finales de graduación, permitiendo no sólo que el estudiante cumpla con un requisito de graduación, sino que han tenido un impacto positivo para las instituciones donde los desarrollaron, como se procede a resumir en las tablas V, VI, VII y VIII.

**TABLA V**  
Proyectos más relevantes desarrollados durante el 2014 (parte I)

NOMBRE DEL PROYECTO	DESCRIPCIÓN	APORTE
Propuesta de diseño para el SIG aplicado a dos proyectos hidroeléctricos	Propuesta para manipular y consultar datos geoespaciales almacenados en archivos CAD, desde sus aportes a los PHs, hasta el presente y futuro, con el objetivo de establecer los lineamientos para la integración de datos topográficos al SIG, utilizando los insumos generados en campo y procesados en oficina, como apoyo a los procesos de construcción de la arquitectura de datos geoespaciales.	El 98% de la energía producida en el país proviene de fuentes renovables, con el piloto de dos proyectos hidroeléctricos se permitió la visualización y consulta de información topográfica actualizada crítica para los departamentos.
Implementación de una base de datos para el cálculo de velocidades para calles mediante información remota de automóviles y camiones de reparto para San José Costa Rica.	Propuesta para determinar la velocidad promedio de la calle según el sentido vial usando un promedio del atributo velocidad de los probes más cercanos a la calle, mediante la función de proximidad que integran las bases de datos espaciales.	Al transmitir en tiempo real la información del tráfico en las calles por donde se van desplazando los conductores, les permite la búsqueda de rutas alternas, reduciendo el tiempo de desplazo a sus destinos.

**TABLA VI**  
Proyectos más relevantes desarrollados durante el 2014 (parte II)

NOMBRE DEL PROYECTO	DESCRIPCIÓN	APORTE
Diseño e implementación de una base de datos espacial aplicado en la web para los sitios arqueológicos de la región de San Ramón	Desarrollo de una base de datos que mejore la administración, gestión y divulgación del registro de sitios arqueológicos cuyos resultados obtenidos pueden estar disponibles a diferentes públicos.	Los sitios arqueológicos registrados representan la labor investigativa durante casi cincuenta años, que pudieron ser compartidos de una forma más segura y controlada por la institución.
Desarrollo de un sistema de información geográfica en ambiente web para la consulta de datos catastrales de los predios.	Desarrollo de una base de datos espacial que ayude a un ordenamiento registral y catastral, con el objetivo que permita la implementación de servicios de mapas en internet para la toma de decisiones de los altos mandos de la institución.	Ha permitido a la empresa tener un mayor control de propiedades y terrenos donde se encuentra la infraestructura y los activos que administra desde sus inicios y que con el paso del tiempo ha crecido.

**TABLA VII**  
Proyectos más relevantes desarrollados durante el 2015

NOMBRE DEL PROYECTO	DESCRIPCIÓN	APORTE
Propuesta de diseño de un SIG para la gestión y consulta de información del Plan GAM 2013 y los bonos individuales.	Desarrollo de un sistema de información geográfica institucional que permita ordenar la información cartográfica y estadística que ha sido recogida con el tiempo y aquella elaborada de acuerdo a los estudios y proyectos de los departamentos.	Ha permitido el monitoreo de variables asociadas a las actividades humanas, facilitando la toma de decisiones en materia de desarrollo territorial.
Identificación de zonas de vulnerabilidad, ante derrames de hidrocarburos en la costa del Pacífico en Costa Rica.	Elaboración de mapas de sensibilidad de las áreas marino costeras en el Pacífico centroamericano, ante derrames de hidrocarburos, con la correspondiente identificación de zonas de alta vulnerabilidad que contemple elementos como infraestructura portuaria y rutas de transporte marítimo, así como hábitats y ecosistemas marinos y costeros críticos para las actividades productivas en la región.	Ha permitido reducir el impacto ambiental y socioeconómico de derrames de hidrocarburos en las rutas de transporte marítimo, especialmente las de petroleros y tanqueros en el Pacífico Central de Costa Rica.

**TABLA VIII**  
Proyectos más relevantes desarrollados durante el 2017

NOMBRE DEL PROYECTO	DESCRIPCIÓN	APORTE
Diseño de un sistema de información geográfica para la toma de decisiones en acciones estratégicas en materia de seguridad vial.	Diseño de un sistema de información geográfica que permita un manejo eficiente de información geográfica de las acciones estratégicas institucionales y la seguridad vial del país, para gestionar los procesos de tomas de decisiones en el territorio con base en criterios técnicos y científicos.	Ha permitido la elaboración de acciones estratégicas en materia de seguridad vial.

Una parte considerable del éxito de estos proyectos en las instituciones y empresas, y por consecuencia su impacto de forma directa o indirecta en la sociedad, ha sido alcanzada gracias a la estrategia de enseñanza aprendizaje con la que se cubre el eje temático de bases de datos en el programa.

#### IV. CONCLUSIONES

A continuación se enumeran las principales conclusiones que se han obtenido en este trabajo:

- El uso de software libre SIG les permite a las profesiones sistemas de información de geográfica lograr desarrollar soluciones factibles, tanto en alcance como en costo, al no incurrir en altos costos de inversión en licenciamiento, acoplándose tanto a proyectos sencillos como complejos. Por otro lado, este curso es la aplicación de los conocimientos de bases de datos dirigido a profesionales en el campo que les permite generar la independencia tecnológica y que ellos mismos puedan gestionar sus propios datos.
- Las herramientas de TI actuales les permiten a los estos profesionales visualizar, gestionar, editar y analizar datos; logrando que la información a procesar sea más fácil de compartir y de una forma más eficiente.
- Los equipos interdisciplinarios en los trabajos actuales son de gran importancia; sin embargo el ingeniero en computación e informática debe acoplarse para poder colaborar en el proceso de gestión de la información y entender que dentro de esta disciplina es un colaborador para el desarrollo de un gran proyecto.
- Los estudiantes del curso han tenido un gran desempeño del mismo, no solo por su alta aprobación, sino que han logrado implementar una solución al trabajo diario en muchas instituciones del país.
- Al ser dos cursos del área de maestría, la cual es impartida por dos universidades públicas muy importantes de Costa Rica, ha permitido el intercambio de conocimientos entre los docentes del área y poder trabajar de manera interdisciplinaria con docentes cuya área de trabajo son las TIC.
- Las herramientas de software libre utilizadas en el curso, fueron de un gran beneficio para los estudiantes, ya que son herramientas que le permiten desarrollar un trabajo en su área, logrando grandes resultados. Lo cual quiere decir que estas herramientas, aunque no tienen un costo económico, generan resultados óptimos.
- El aprendizaje learning by doing genera en el estudiante un gran conocimiento, ya que los temas vistos en los dos cursos, los estudiantes lograron aplicar sus conocimientos desde la primera clase, esto aumenta la motivación con el tema durante la clase y convierte al docente en un facilitador del proceso.

#### AGRADECIMIENTOS

A los estudiantes de los cursos de Diseño y Explotación de Bases de Datos e Implementación de Bases de Datos Geográficas de la Maestría Profesional en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, que gracias a su compromiso y dedicación en las clases fue posible esta participación, así como a la Escuela de Computación del Instituto Tecnológico de Costa Rica por su apoyo y patrocinio para participar de este congreso.

#### REFERENCIAS

- CH. Reigeluth; J. Moore. La enseñanza cognitiva y el ámbito cognitiva. En: Diseño de la instrucción. Teorías y modelos. Madrid: Aula XXI Santillana, 2000.
- Docs.moodle.org. (2017). Acerca de Moodle - MoodleDocs. [en línea] Disponible en: [https://docs.moodle.org/all/es/Acerca\\_de\\_Moodle](https://docs.moodle.org/all/es/Acerca_de_Moodle) [Accedido 20 mayo 2017].
- E. De Graat; A. Kolmos. "Characteristics of Problem-Based Learning". International Journal of Engineering Education, Vol 5, No 19, pp. 657-662, 2003.
- E. Parra; C. Castro; M. Amariles. "Casos de éxito de la aplicación de la metodología de aprendizaje basado en problemas ABP". IngEam No 1, pp. 12-23, 2014.
- Gnu.org. (2017). El sistema operativo GNU y el movimiento del software libre. [en línea] Disponible en: <http://www.gnu.org/home.es.html> [Accedido el 20 mayo 2017].
- Malinowski, E. and Zimányi, E. (2010). Advanced Data Warehouse Design. 1st ed. Berlin: Springer, p.133.
- Olaya, V. (2016). Sistemas de Información Geográfica. Lugar de publicación no identificado: CREATESPACE.
- Programa de Maestría en Sistemas de Información Geográfica y 7 Teledetección Escuela de Ciencias Geográficas. (2010). Revista Geográfica de América Central, 45(2), pp.201-207.
- Sáez, J. M., & Ruiz, J. M. (2012). Metodología didáctica y tecnología educativa en el desarrollo de las competencias cognitivas: aplicación en contextos universitarios. Profesorado, revista de currículum y formación del profesorado, 16(3), pp.373-391.
- Solano Mayorga, M., Moraga Peralta, J. and Cedeño Montoya, B. (2000). Historia y evolución de los sistemas de información geográfica en Costa Rica. Revista Geográfica de América Central. Vol. 2 No. 43 (2010). Red Universidad Nacional de Costa Rica.



# La enseñanza de la geografía (SIG) en la Universidad Estatal a Distancia de Costa Rica, periodo 2013-2016

Álvarez-Garay, Benjamín<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cátedra Sistemas de Información Geográfica / Escuela Ciencias Exactas y Naturales / Universidad Estatal a Distancia  
Mercedes, Montes de Oca / San José / Costa Rica  
balvarez@uned.ac.cr

## RESUMEN

La enseñanza de la geografía en la Universidad Estatal a Distancia (UNED) es una actividad permanente y apoyada por la Cátedra de Sistemas de Información Geográfica y el Laboratorio de Investigación e Innovación Tecnológica (LIIT). Se desarrollan asignaturas (plan de licenciatura), cursos (para estudiantes y funcionarios), talleres y charlas (para instituciones públicas y privadas). Además, se ha conformado una Infraestructura de Datos Espaciales institucional para capacitaciones.

Brindar herramientas básicas para el manejo adecuado de un receptor de señal satelital, uso de un programa SIG, construcción de datos espacial, geo-referenciación de información, así como la introducción al análisis espacial y opciones para la presentación de documentos, informes y trabajos de investigación. Es un proyecto de extensión universitaria, que apoya la enseñanza de la geografía. Utiliza estrategias como i) plataformas virtuales, ii) video-tutoriales, iii) tutorías presenciales, iv) blog especializado y utiliza herramientas como i) programa SIG, ii) cartografía, iii) trabajo de campo y iv) casos de estudio. Se recomienda lectura en geografía. En la oferta académica formal se tiene la asignatura Geomática y Cartografía Digital, y Sistemas de Información Geográfica y Agromática, disponibles de forma cuatrimestral. La oferta académica no formal posee el curso sobre SIG de forma semestral, y los talleres y charlas, para instituciones específicas. La participación activa de estudiantes y funcionarios en la temática de geografía y SIG ha generado que tanto las asignaturas, cursos y talleres se presenten de forma continua e implementando técnicas diferentes de evaluación.

Palabras clave: **Educación a distancia, enseñanza, SIG, GPS, UNED.**

## ABSTRACT

*The teaching of geography at the Universidad Estatal a Distancia (UNED) is a permanent activity and supported by the Department of Geographic Information Systems and the Laboratory of Research and Technological Innovation (LIIT). Courses are developed (bachelor's degree plan), courses (for students and staff), workshops and talk educational talks (for public and private institutions). In addition, an institutional Spatial Data Infrastructure has been formed for training.*

*Provide basic tools for the proper management of a satellite signal receiver, use of a GIS program, spatial data construction, geo-referencing of information, as well as introduction to spatial analysis and options for presentation of documents, reports and work investigation. It is a university extension project, as it supports the teaching of geography. It uses strategies such as i) virtual platforms, ii) video tutorials, iii) face-to-face tutorials, iv) specialized blog and uses tools such as i) GIS program, ii) cartography, iii) field work and iv) case studies. In addition, reading in geography is recommended. In the formal academic offer has the subject Geomatics and Digital Mapping, and Geographic and Agromatic Information Systems, available on a quarterly basis. The non-formal academic offer has the semester GIS course, and the workshops and talk educational, for specific institutions. The active participation of students and staff in geography and GIS has led to both courses, courses and workshops being presented on a continuous basis and implementing different assessment techniques.*

**Keywords:** *Distance education, Teaching, GIS, GPS, UNED.*

## I. INTRODUCCIÓN

En la Universidad Estatal a Distancia (UNED), la enseñanza de la geografía se presenta desde los años noventa y el uso de los sistemas de información geográfica a finales de la década del 2000. Con la creación de la Cátedra Sistemas de Información Geográfica (año 2014) se implementan materias en educación formal (asignaturas), que se imparten en dos programas de estudio (Manejo de Recursos Naturales e Ingeniería Agronómica) y en educación no formal (cursos, talleres y charlas), los cuales se ofrecen a estudiantes y funcionarios universitarios y de instituciones públicas (Álvarez-Garay & Córdoba-Gamboa, 2015).

Las asignaturas (Geomática y Cartografía Digital para Manejo de Recursos Naturales, y Sistemas de Información Geográfica y Agromática para Ingeniería Agronómica), están insertos en los planes de estudios de ambos programas a nivel de licenciatura y tienen como finalidad, brindar a los estudiantes herramientas de gestión espacial y la representación de datos de sus áreas de estudio.

Los cursos, talleres y charlas, pretenden desarrollar en las personas participantes conocimientos y fundamentos básicos de los SIG y geo-referencia de datos en el campo, aplicados al quehacer propio de cada institución.

Para el desarrollo de estas actividades, la geografía y los SIG son una herramienta fundamental en la educación ya que permiten la adaptación y continuidad del aprendizaje, introducen nuevas formas de pensamiento y permiten la construcción del aprendizaje en nuevas tecnologías aplicadas a diferentes disciplinas (Álvarez-Garay & Álvarez-Castro, 2012).

En la UNED, el proceso pedagógico para la enseñanza de la geografía, está basado en el uso de herramientas interactivas y que promuevan la participación del estudiante, es así como el uso de videos, blogs y prácticas en red son necesarias para despertar en el estudiante su carácter investigativo y promueva una enseñanza participativa y moderna (Santiago-Rivera, 2013; UNED, 2016).

Este proceso de enseñanza se desarrolla bajo el modelo de educación a distancia, el cual, toma los aspectos básicos de la enseñanza y de la educación tradicional (presencial), como mediación pedagógica y los transforma en el acompañamiento, promoción y aprendizaje de una forma no presencial, es decir, el docente o como es llamado en este tipo de educación, el tutor, provee técnicas, guías y herramientas necesarias para que el estudiantado pueda aprender y entender lo que se expone en el curso, sin la presencia de una persona que dirija la clase o lección (Alfonso-Sánchez, 2003).

La educación a distancia, se apoya en recursos no tradicionales (tutoría presencial, quices, presentación en aula, entre otros), para la ejecución de sus objetivos y metas, tomando como base, aquellos recursos que fomenten la interacción de las estudiantes, sin que ellos estén presentes, tanto en tiempo como en espacio; es así como el uso de una plataforma electrónica, desarrollo de foros, uso de unidades didácticas multimediales, videos, desarrollo de blogs, entre otros recursos, son necesarios e importantes en la enseñanza a distancia (CNIIE, 2013).

Por su parte la educación tradicional (presencial), se presenta como un curso en donde los estudiantes, aprenden conceptos, desarrollaban actividades académicas (exámenes, quices) y dedican horas aprendiendo a utilizar un programa especializado en sistemas de información geográfica. Este proceso era repetido (varias veces a la semana) y en algunos casos, los estudiantes tenían poca motivación para seguir cursando la materia (Hernández & Ordoqui, 2009).

Este documento plantea brindar las herramientas básicas para el manejo adecuado de un programa SIG, receptor de señal satelital, construcción de datos espacial, geo-referenciación de información, así como la introducción al análisis espacial y opciones para la presentación de documentos, informes y trabajos de investigación.

Se pretende también que la geografía y los SIG ayuden a la comprensión de cambios importantes en el espacio, tanto en su composición y estructura. Como también explicar que el modelo análogo de los SIG (enseñanza basada en las cartas topográficas realizadas a mano y del saber popular), el modelo digital (utilización de programas especializados para la construcción de geográfica y cartografía) y el modelo automatizado (vinculación de la geografía a las nuevas tendencias de la tecnología, redes e información colaborativa) son parte de un proceso que se debe entender y estudiar para aplicarlos a las diferentes ciencias o disciplinas (Buzai, 2012).

## II. MÉTODO

Este es un proyecto de extensión, ya que trata de dar las pautas básicas para el manejo y uso básico de un sistema de información geográfica (SIG), y levantamiento de información espacial, mediante receptores de posicionamiento global (GPS).

Para ello, en la Universidad Estatal a Distancia se tienen dos tipos de ofertas académicas i) formal y ii) no formal (ver figura 1).

La primera oferta se refiere a las asignaturas Geomática y Cartografía Digital, código 03281, que se imparte en el pro-

grama Manejo de Recursos Naturales (MARENA) para los tres cuatrimestres del año a nivel de licenciatura y Sistemas de Información Geográfica y Agromática, que se presenta para el programa de Ingeniería Agronómica, para el nivel de licenciatura, solamente en el tercer cuatrimestre.

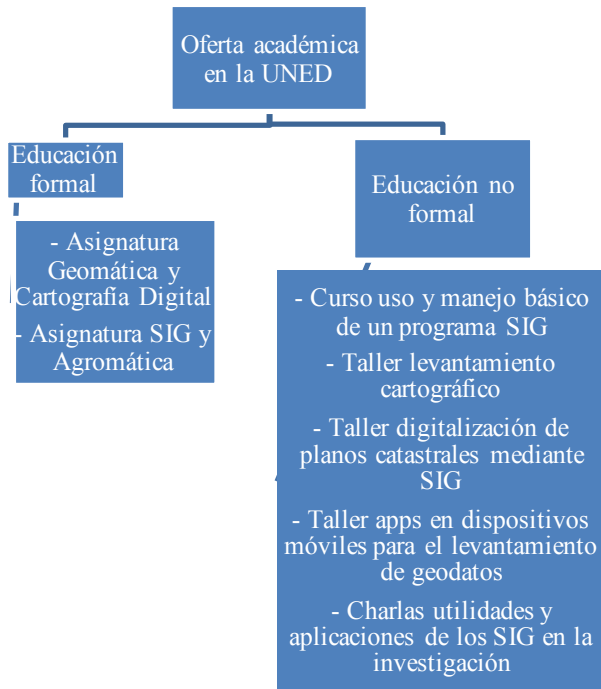


Figura 1: Oferta académica de la enseñanza de la geográfica (SIG) en la UNED

Fuente: Benjamín Álvarez Garay, 2017

El desarrollo de estas asignaturas, se apoyan en estrategias de enseñanza donde se presentan clases magistrales, clases virtuales, videotutoriales y trabajo de campo (ver figura 2).

La segunda oferta corresponde al curso uso y manejo básico de un programa en sistema de información geográfica, al taller levantamiento cartográfico mediante el uso de receptor de señal satelital (GPS), el taller digitalización de planos catastrales mediante sistemas de información geográfica, el taller aplicaciones (apps) en dispositivos móviles para el levantamiento de geodatos y la charla sobre las utilidades y aplicaciones de los SIG en la investigación.

Para esta oferta académica (no formal), el curso se ofrece dos veces al año (de forma semestral), los talleres una vez al año y la charla de acuerdo con la demanda de las personas que lo solicitan (generalmente dos veces al año).

Estos dos tipos de ofertas académicas se apoyan en estrategias de enseñanza, las cuales ayudan a una mejor comprensión de la temática geográfica (ver figura 2).

Las cuatro estrategias de enseñanza se presentan en las asignaturas y curso SIG. Para el caso de los talleres, se utilizan las estrategias clases magistrales y videotutoriales.

Estas estrategias de enseñanzas están apoyadas por herramientas de enseñanza, las cuales facilitan la comprensión y desarrollo del aprendizaje de los SIG en la UNED (ver figura 3).

En todas las ofertas académicas los programas en SIG son el eje transversal, seguido de los videotutoriales, ya que ayudan a comprender y apoyar los geoprocesos realizados, por su par-

te los receptores GPS se utilizan en las asignaturas y en el taller de levantamiento cartográfico.

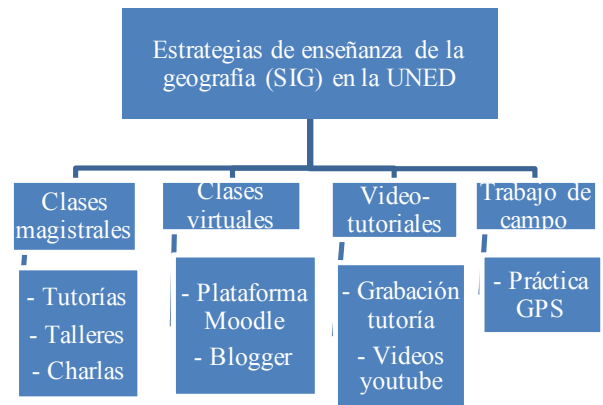


Figura 2: Estrategias de enseñanza de la geografía (SIG) en las ofertas académicas.

Fuente: Benjamín Álvarez Garay, 2017.

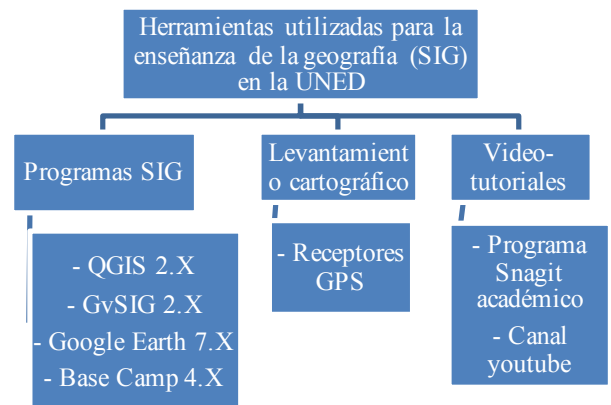


Figura 3: Herramientas utilizadas para la enseñanza de la geografía (SIG) en la UNED.

Fuente: Benjamín Álvarez Garay, 2017.

### III. RESULTADOS

La enseñanza de los SIG en la UNED está en crecimiento, pues desde 2013 al 2016, se han capacitado 287 estudiantes, 44 funcionarios de la UNED y 72 funcionarios de instituciones públicas (Ministerio de Salud, Sistema Nacional de Áreas de Conservación y Ministerio de Hacienda). Este proceso de enseñanza es esencial, ya que genera conciencia de la importancia de los SIG y las ciencias geográficas en el desarrollo de proyectos, investigaciones y formación personal y académica.

A nivel global, se trata de que la enseñanza de la geografía y los SIG, tengan una estructura definida y que sea alimentada con las necesidades que plantean las personas que ingresan a las asignaturas, cursos y talleres.

Se detalla a continuación los resultados que la UNED y en la Cátedra de Sistemas de Información Geográfica ha venido desarrollando en la temática de SIG, además del uso de las estrategias y herramientas utilizadas.

## 1. ASIGNATURAS

Las asignaturas corresponden a las materias que poseen una evaluación sumativa y evaluativa de un programa de estudio, las cuales poseen una nota final y forman parte de una currícula universitaria (UNED, 2012).

La asignatura Geomática y Cartográfica digital, código 03281 forma parte del Programa Manejo de Recursos Naturales y se ubica en el primer bloque de licenciatura y tiene como objetivo la aplicación de un paquete de Sistemas de Información Geográfica, para la creación y manejo de bases de datos, gestión de fotografías aéreas e información ráster, descarga de datos GPS, para la elaboración de modelos espaciales, reportes tabulares y cartográficos. Posee 3 créditos, 135 horas de desarrollo y se imparte 3 cuatrimestres al año.

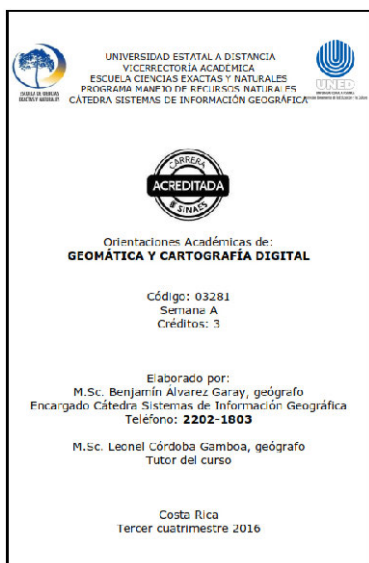


Figura 4: Portada de la orientación académica de Geomática y Cartografía Digital.

Fuente: Cátedra Sistemas de Información Geográfica, 2016.



Figura 5: Trabajo de campo de la asignatura SIG y Agromática. Guácimo, Limón, 2013.

Fuente: Cátedra Sistemas de Información Geográfica, 2013

Por su parte la asignatura Sistemas de Información Geográfica y Agromática, código 3133, forma parte del programa Ingeniería Agronómica y tiene como objetivo introducir a los y las estudiantes en el concepto y utilización de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) en lo que respecta a captura, procesamiento, análisis y presentación de información en el campo de la agronomía, así como de contribuir en el desarrollo de conocimientos, habilidades y destrezas de los elemen-

tos básicos del uso de la agromática y sus aplicaciones potenciales en los sistemas de producción agropecuaria. Posee 3 créditos, 135 horas de desarrollo y se imparte en el tercer cuatrimestre de cada año.

De acuerdo con los datos proporcionados por la unidad de Registro de la UNED, se tiene que desde el 2013 hasta el 2016, 148 estudiantes cursaron estas asignaturas, donde 139 aprobaron y 9 la reprobaron (ver cuadro 1).

### CUADRO 1.

CANTIDAD DE ESTUDIANTES APROBADOS Y REPROBADOS EN LAS ASIGNATURAS 03281 Y 03133

AÑO	APROBADOS	REPROBADOS	TOTAL
2013	3	0	3
2014	30	3	33
2015	40	1	41
2016	66	5	71
<b>TOTAL</b>	<b>139</b>	<b>9</b>	<b>148</b>

Fuente: Unidad de Registro, UNED, 2017.

Para ambas asignaturas se desarrollan las siguientes actividades de evaluación:

i) Laboratorios: se ofrecen tres laboratorios o tutorías presenciales, donde los estudiantes tienen un espacio de contacto con el profesor, para aclarar dudas y desarrollar actividades y prácticas. Los laboratorios también presentan espacios virtuales donde se desarrollan prácticas en casa y en el lugar de trabajo.

ii) Trabajo de campo: se ofrece una tutoría en la cual realizan un trabajo de campo. Consiste en desarrollar una práctica con un receptor de señal satelital (GPS), donde los estudiantes desarrollan las habilidades aprendidas en los laboratorios, practican técnicas de recolección de geodatos y aplican las metodologías explicadas en clase.

iii) Plataforma tecnológica: cada asignatura ofrece una plataforma tecnológica (plataforma virtual Moodle 3.x), en donde el estudiante aclara sus dudas, resuelve ejercicios académicos y entrega prácticas y trabajos evaluados. Además, es el medio en donde los estudiantes pueden consultar y descargar las tutorías grabadas.

iv) Material multimedia: corresponden a los materiales de apoyo y guía a los estudiantes. Se dispone de un blog especializado en teorías sobre información geográfica (<http://inecumene.blogspot.com/>), videos sobre uso de SIG (<https://www.youtube.com/user/bamauriel/videos>) y el libro digital "Sistemas de Información Geográfica", desarrollado por el señor Victor Olaya, año 2014. Este libro sirve para conocer la teoría SIG de una forma general.

v) Programas especializados: los programas utilizados en las asignaturas corresponden al programa geográfico Quantum Gis 2.x (Qgis), Google Earth 7.x y Base Camp 4.x. Con estos programas se desarrollan las prácticas en las tutorías o laboratorios.

La totalidad de los estudiantes que cursan esta asignatura, deben aplicar alguna técnica SIG en su trabajo final de graduación, ya sea desarrollando un mapa temático o aplicando una metodología para la recolección de geodatos en el campo, de esta forma se evalúa la utilidad de las asignaturas en los programas de estudio.

Además estas asignaturas sirven como una herramienta base para que se puedan aplicar en el desarrollo del programa de licenciatura, ya sea en la construcción de cartografía de sus trabajos de investigación o trabajos de campo.

## 2. CURSO SOBRE SIG

El curso no posee una evaluación formal, ni tampoco forma parte de un plan de estudios o currícula, corresponde principalmente a un curso de actualización personal y profesional donde el estudiante y el profesional deciden si quieren aprender a utilizar un programa SIG y así aplicarlo en su quehacer profesional (UNED, 2012).

Al igual que las asignaturas, el curso sobre SIG, se apoya en el desarrollo de videos de las clases presenciales, uso del blog especializado en SIG para fortalecer el conocimiento y gestión de los programas utilizados.



Figura 6: Desarrollo del curso SIG a funcionarios del SINAC. Carara, Puntarenas, 2014.

Fuente: Cátedra Sistemas de Información Geográfica, 2014

Para el desarrollo de este curso, se ha estructurado en módulos, por tanto, el estudiante y el profesional deciden cuales módulos cursar y cuales desarrollar de forma exhaustiva. Los módulos del taller corresponden a:

i) Conceptos básicos en SIG e introducción a programa SIG: se desarrolla de forma presencial y comprende, todo el componente teórico sobre los SIG, antecedentes e influencia en la actualidad. Posee una duración de 4 horas presenciales.

ii) Creación, gestión y digitalización de archivos vectoriales y manipulación de tablas alfanuméricas (geodatos): Se desarrolla de forma presencial y prácticas virtuales. Se enfoca principalmente en la creación de datos vectoriales y construcción de datos en la tabla de atributos. Posee una duración de 8 horas presenciales y 6 horas virtuales.

iii) Levantamiento cartográfico mediante Receptor de Señal Satelital: Se desarrolla un trabajo de campo, la persona debe gestionar un receptor de señal satelital (GPS) y recolectar datos de campo, mediante la función de "waypoint" y "tracklog". Posee una duración de 8 horas presenciales.

iv) Introducción al uso de la herramienta vectorial: Se desarrolla de forma presencial y prácticas virtuales. Se practican las funciones de herramienta de análisis, herramienta de investigación, herramientas de geometría y geoprocésamiento básico (unir, cortar, pegar, disolver y buffer). Posee una duración de 4 horas presenciales y 4 horas virtuales.

v) Introducción al uso de la herramienta ráster: Se desarrolla de forma presencial y prácticas virtuales). Se genera la creación de modelos de elevación, análisis espacial, recorte y extracción de información rasterizada. Posee una duración de 4 horas presenciales y 4 horas virtuales.

La información de participación al curso sobre SIG, para los años 2013 al 2016, se muestra a continuación:

### CUADRO 2.

CANTIDAD DE ESTUDIANTES Y FUNCIONARIOS QUE HAN LLEVADO EL CURSO SIG

AÑO	ESTUDIANTES	FUNCIONARIOS UNED	INSTITUCIONES PÚBLICAS	TOTAL
2013	36	1	0	37
2014	46	1	2	49
2015	37	19	42	98
2016	20	23	20	63
<b>TOTAL</b>	<b>139</b>	<b>44</b>	<b>64</b>	<b>247</b>

Fuente: Cátedra Sistemas de Información Geográfica, 2017.

En el cuadro 2 se puede observar que 247 personas lo han cursado, de los cuales 139 son estudiantes (nivel de bachillerato universitario), 44 funcionarios de la UNED y 64 funcionarios de instituciones públicas.

Para el caso de los funcionarios de la UNED, ellos solicitaron el curso a la Cátedra Sistemas de Información Geográfica, ya que querían aplicar alguna técnica SIG en los proyectos de extensión e investigación que estaban desarrollando con la universidad. Similares objetivos poseen los funcionarios de instituciones públicas como Ministerio de Salud, Sistema Nacional de Áreas de Conservación y Ministerio de Hacienda.

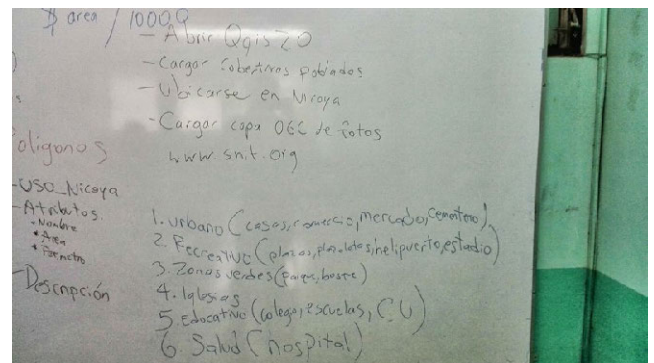


Figura 7: Práctica de digitalización en el curso SIG. Nicoya, Guanacaste, 2013.

Fuente: Cátedra Sistemas de Información Geográfica, 2013.

Los funcionarios del Ministerio de Salud tomaron como base el curso para crear una Infraestructura de Bases de Datos Espaciales (IDE) en salud, primera en Costa Rica y con ello poner a disposición de la población costarricense los datos más relevantes en materia de salud. Para el caso de los funcionarios del Sistema Nacional de Áreas de Conservación, el curso les sirvió para desarrollar metodologías propias para el levantamiento de geodatos en materia de recursos naturales y áreas de protección; por su parte los funcionarios del Ministerio de Hacienda están apostando por la creación de un laboratorio en SIG, para luego generar una IDE en materia de tributos para Costa Rica.

Se puede concluir que el curso SIG, es una herramienta adecuada para aquellas personas que no poseen tiempo para cursar una carrera universitaria, sin embargo, en su quehacer profesional, ocupan una herramienta espacial para facilitar el análisis de datos y presentación de información.

## 3. TALLERES

El taller es una estrategia de enseñanza que busca introducir a las personas la importancia del uso de una aplicación SIG a una actividad en específico. Para ello se han ejecutado tres

talleres: i) levantamiento cartográfico mediante receptor de señal satelital, ii) digitalización de planos catastrales mediante el uso de un sistema de información geográfica y iii) aplicaciones (apps) en dispositivos móviles para el levantamiento de geodatos (UNED, 2012).

El taller sobre levantamiento cartográfico se da en conjunto con el curso SIG y lo que pretende es obtener datos con el receptor de señal satelital (GPS), para la descarga de información, almacenamiento y análisis de la misma, y con ello la creación de archivos y coberturas vectoriales para la elaboración de cartografía temática.



Figura 8. Práctica de GPS en el taller levantamiento cartográfico. Liberia, Guanacaste, 2015.  
Fuente: Proyecto Geovisión, 2015.

Se imparte de forma presencial y tiene una duración de 8 horas. Se realiza una presentación sobre el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS, siglas en inglés) y sus redes, seguidamente se da un espacio para gestionar un receptor GPS, las funciones y capacidades que posee, se realiza un trabajo de campo, donde las personas recolectan geodatos de puntos y líneas, y se finaliza el taller exportando esa información a un programa SIG y la elaboración de un mapa temático.

La utilidad de este taller se centra en que las personas puedan aplicar una metodología de recolección de datos en el campo, por ejemplo, georreferenciar fincas y lotes de los cuales no existe un plano o mapa y se requiere representar para su aprovechamiento, como también la definición de rutas para senderos de carácter turístico.

El taller digitalización de planos catastrales mediante el uso de un sistema de información geográfica, se imparte una vez al año y posee una duración de 12 horas.

El objetivo de este taller es que las personas aprendan como trasladar la información de un plano catastral a un sistema de información geográfica, para ello, la persona debe llevar un plano catastral, seguidamente se le entrega una hoja Excel, la cual posee los datos de transformaciones de azimut y coordenadas, y se finaliza con la exportación de los datos del Excel a un SIG para la conformación del plano catastral a escala, visto en un mapa.

Este taller es solicitado por empresas pertenecientes a la ganadería y agricultura, ya que constantemente ellos requieren definir zonas o mapas de siembra, como también zonas de amortiguamiento y zonas de conservación.

Por último, el taller aplicaciones (apps) en dispositivos móviles para el levantamiento de geodatos, se imparte una vez al año y posee una duración de 8 horas. Tiene como objetivo darles herramientas de ubicación en dispositivos móviles para la ubicación y toma de datos en el campo.

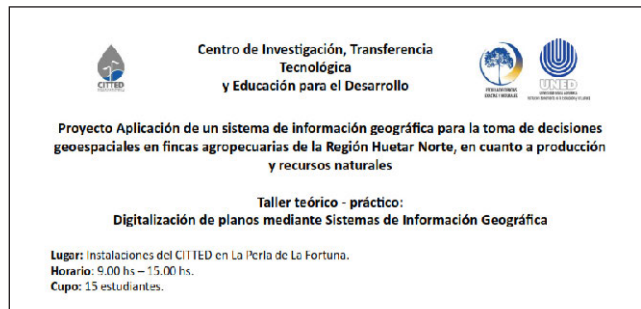


Figura 9. Convocatoria para el taller digitalización de planos catastrales mediante SIG.

Fuente: Proyecto SIG en fincas agropecuarias, 2016.

Se inicia con una presentación sobre la teoría de cartografía; que es una aplicación móvil, sobre que dispositivos se pueden instalar y cuales apps de ubicación son recomendadas para la recolección de geodatos en el campo.



Figura 10. Inicio del taller apps para dispositivos móviles. Cañas, Guanacaste, 2015.

Fuente: Laboratorio de Investigación e Innovación Tecnológica, 2015.

Seguidamente se realiza un trabajo de campo con las aplicaciones instaladas (celular o tableta) y se finaliza con la descarga de los geodatos y la conformación de un mapa.

Para estos tres talleres se utilizan las siguientes estrategias de enseñanza:

**Tutoría presencial:** se asigna un espacio, donde las personas asistan. Se explica cómo se procederá a trabajar durante el día, además de la entrega de materiales y enlaces de consultas concernientes al taller y a programas especializados.

**Tutoría virtual:** es el espacio disponible que tiene las personas para que puedan desarrollar lo visto del taller en su casa o lugar de trabajo. Se desarrollan una serie de prácticas y actividades, que son ejecutadas en la tutoría virtual y se refuerzan con otros ejemplos.

**Observación:** una de las técnicas utilizadas, para conocer el grado de avance de las personas, respecto al nuevo conocimiento que están adquiriendo. Con esta técnica se observa el grado de avance de cada participante en el taller. Es fundamental, ya que gracias a la observación se analizan, cuáles son los temas de interés por parte de los participantes y cuales temáticas son las que se deben reforzar.

Este tipo de tecnología es muy utilizada por parte de los estudiantes tesarios, ya que al no contar con un receptor GPS pueden utilizar sus teléfonos inteligentes para la toma de datos en el campo. A nivel general el 50% de las personas realizan este taller, aplican metodología de toma de geodatos con apps móviles.

#### 4. CHARLAS

La charla es una conferencia de corta duración (entre 30 minutos hasta dos horas), en donde se expone un tema en específico que es de interés de las personas presentes. Para el caso de la enseñanza de la geográfica en la UNED, se han desarrollado dos charlas sobre las utilidades y aplicaciones de los SIG en la investigación universitaria.

La primera charla se desarrolló en el año 2015, en el marco del día SIG (GIS Day) y tenía como finalidad exponer la importancia de los SIG en el quehacer universitario, qué técnicas se podían utilizar y qué productos se podrían obtener con la aplicación de SIG en proyectos.



Figura 11. Charla sobre la utilidad de los SIG en el marco del GIS Day, 2015. Campus Central-UNED.

Fuente: Laboratorio de Investigación e Innovación Tecnológica, 2015.

La segunda charla se desarrolló en el año 2016, en el marco del día del teletrabajo y tenía como objetivo desarrollar un análisis de las personas teletrabajadoras en la UNED, para la propuesta de rutas y medios adecuados para su desplazamiento.

Ambas charlas fueron solicitadas por las personas organizadoras de los eventos, con el fin de exponer a la comunidad universitaria como la geografía y los SIG pueden ayudar a solucionar temáticas específicas, además de promocionar el uso de los SIG en los diferentes proyectos universitarios y vinculación con extensión e investigación.



Figura 12. Expositores de la conferencia: "Día del teletrabajo de la UNED". Campus Central-UNED, 2016.

Fuente: Programa Teletrabajo UNED, 2016.

La participación en estos espacios fue de profesionales en diversos campos, así como estudiantes universitarios que buscaban diferentes metodologías para el análisis de la información que estaban desarrollando y querían presentarlas de forma más amena.

#### IV. CONCLUSIONES

El uso de programas SIG bajo la política de código abierto, ha facilitado el desarrollo de las asignaturas, talleres y cursos, pues tanto estudiantes como funcionarios, pueden invertir sus recursos en tiempo y herramientas para sus proyectos de investigación.

El profesor-tutor, ha ido incorporando las observaciones que han realizado los estudiantes y funcionarios, como un mecanismo de autoevaluación, esto se ve reflejado en la profundidad de los módulos y complejidad de las prácticas.

Tanto la modalidad virtual como presencial tienen sus facetas positivas y negativas, sin embargo, ambas pretenden enseñar y dar utilidad a una herramienta que es fundamental en cualquier área de estudio y un mecanismo para la aclaración de dudas.

Los materiales multimediales son fundamentales en este proceso, ya que mantienen al estudiante a la expectativa de aprender algo novedoso y sobre todo con la guía virtual del profesor-tutor. Este tipo de materiales son esenciales en la educación a distancia, pues permiten una interacción virtual entre el estudiante, las herramientas SIG y el profesor-tutor.

Las prácticas desarrolladas de forma virtual y las guías de estudio que cada estudiante resuelve son apoyadas con el contacto directo con el profesor-tutor, en al menos una sesión, esta para la evacuación de dudas, orientación a los estudiantes y exploración de nuevas herramientas y técnicas en SIG.

El desarrollo de las asignaturas, talleres y charlas en temática de geografía y SIG se gestiona a través de la Cátedra de Sistemas de Información Geográfica, administrada por la Carrera de Manejo de Recursos Naturales, Escuela Ciencias Exactas y Naturales.

Los módulos y prácticas propuestos tanto en las asignaturas y talleres, pretenden ser autodidactas, ya que la mayoría de las personas le dedican el tiempo necesario y buscan información complementaria para aprender un programa geográfico. Sin embargo, los estudiantes si recalcan la importancia de tener un contacto directo con el tutor, puesto que le da confianza y seguridad a la hora de ejecutar las funciones propias del programa, esto sin duda alguna, es el plus que ofrece la enseñanza de los SIG bajo la modalidad presencial, es decir, un contacto directo con el tutor el cual ayuda y orienta sobre los procesos a desarrollar.

El curso SIG ha sido fundamental en la capacitación de estudiantes y personal de la UNED e instituciones en la temática de geografía, cartografía y SIG, además ha generado conciencia en el uso y desarrollo de programas SIG en proyectos de educación e investigación.

La metodología utilizada en el taller es adecuada para el aprendizaje de programas SIG, pues promueve el carácter investigativo de cada persona, además que el estudiante puede desarrollar su propia cartografía, combinar información espacial, modelar geodatos y generar un análisis espacial de una porción del espacio.

La convocatoria a charlas es adecuada, ya que se coordina de previo con la Cátedra sobre la fecha y el espacio que se dispone, además de la temática que se quiere desarrollar.

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero quiero agradecer a Dios y mi familia por darme las fuerzas, motivación y energía para que este trabajo continúe ejecutándose.

Agradecer al señor Luis Eduardo Montero Castro, director de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales y al señor Héctor Brenes Sotos, Encargado del Programa Manejo de Recursos Naturales, que gracias a su apoyo, se tiene el espacio y los recursos para este proyecto esté vigente y sea parte del trabajo de la Cátedra.

Un especial agradecimiento al señor Leonel Córdoba Gamboa, profesor de las asignaturas, colega y gran amigo. A lo largo de este tiempo, hemos podido consolidar asignaturas, cursos y talleres de calidad que son aprovechados por estudiantes, profesionales de la universidad e instituciones.

Agradecer también a los señores Carlos Andrés Campos Vargas, Roberto Vargas Masís y Andrés Segura Castillo, del Laboratorio de Investigación e Innovación Tecnológica, que, gracias a su apoyo, los talleres y charlas tiene el reconocimiento a nivel universitario.

Muchas gracias a los compañeros y compañeras de trabajo, que de alguna u otra forma han apoyado esta iniciativa. A los estudiantes y participantes de las asignaturas, cursos, talleres y charlas, muchas gracias por la dedicación y participación. Gracias.

## **REFERENCIAS**

Alfonso-Sánchez, I. (2003). La educación a distancia. *ACIMED*, 11(1), 3-4.

Álvarez-Garay, B., & Córdoba-Gamboa, L. (2015). La geo-alfabetización en la Universidad Estatal a Distancia: trabajo con funcionarios y estudiantes. In XV Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (pp. 16-23). Valparaíso, Chile.

Álvarez-Garay, E., & Álvarez-Castro, M. J. (2012). Manejo de las relaciones humanas entre el personal docente y administrativo del Liceo La Palmera , Circuito 04 , Sede Regional San Carlos durante el segundo semestre de año 2012. Universidad Santa Lucía.

Buzai, G. D. (2012). Geografía y sistemas de información geográfica evolución teórico-metodológica hacia campos emergentes. *Revista Geográfica de América Central*, 2(48E), 15-67.

CNIIE. (2013). Enseñanza tradicional versus enseñanza por competencias. Recuperado de <http://blog.educalab.es/cniie/2013/04/21/ensenanza-tradicional-versus-ensenanza-por-competencias/>

Hernández, F. M., & Ordoqui, J. M. (2009). La geografía como campo científico , educativo y de acción . Los desafíos y compromisos en el siglo XXI. *Sapiens. Revista Universitaria de Investigación*, 10(1), 11-40.

Santiago-Rivera, J. A. (2013). La geografía escolar y la formación en docencia de la geografía y ciencias de la tierra. *Uni-Pluri/versidad*, 13(1), 27-35.

UNED. (2012). Reglamento general estudiantil. San José, Costa Rica.

UNED. (2016). Consideraciones para el diseño y oferta de asignaturas en línea. San José, Costa Rica.





# Recursos naturales, ambiente y cambio climático



# Análisis de la sequía en la cuenca del Paute mediante el índice de precipitación estandarizado (SPI)

Pacheco Jheimy<sup>1,2</sup>, Parra Nathaly<sup>2</sup>, Avilés Alex<sup>3</sup>

1 Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE)/Universidad del Azuay  
Av.24 de Mayo 7-77/Azuay/Ecuador  
jlpacheco@uazuay.edu.ec

2 Escuela de Ingeniería de Sistemas y Telemática/ Facultad de Ciencias de la Administración /Universidad del Azuay  
Av.24 de Mayo 7-77/Azuay/Ecuador  
natypa8@hotmail.com

3 Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales / Escuela de Ingeniería Ambiental/ Facultad de Ciencias Químicas/Universidad de Cuenca  
Av.12 de Abril/Azuay/Ecuador  
alex.aviles@ucuenca.edu.ec

## RESUMEN

La sequía se define como un desequilibrio temporal natural de la disponibilidad de agua, que consiste en una persistente precipitación por debajo de los límites normales, con frecuencia incierta, duración y severidad difícil de predecir, aunque se han realizado varios estudios a nivel mundial sobre este fenómeno, pocas son las investigaciones que toman como zona de estudio lugares con geografía tan variada como una cuenca andina y que representan los datos sobre el terreno. El presente estudio aplica el cálculo del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI) sobre 17 estaciones de precipitación en la cuenca del río Paute con una ventana de 12 meses, la recomendada para gestión de recursos hídricos. Los valores de sequía se analizaron en tres intervalos de tiempo 1985 - 1989, 1990 - 1994 y 2000 - 2004 correspondientes a los períodos más secos. Los resultados se muestran sobre mapas de interpolación Kriging ordinario generados a partir del SPI con valores de error dentro de los parámetros aceptables. Los meses más secos son los esperados de acuerdo a estudios previos, excepto en el mes de Mayo de 1985 que registra un SPI de -1.32 en promedio, el más seco de los períodos analizados, lo que lleva a plantearse la influencia de fenómenos de mayor escala que sean capaces de modificar los patrones de lluvia a grandes escalas.

Palabras clave: **cuenca del Paute, Kriging, precipitación, SPI.**

## ABSTRACT

*Drought is defined as a natural temporal imbalance on water availability, consisting of persistent rainfall below normal limits, with uncertain frequency, duration and severity difficult to predict, although several studies have been carried out worldwide on this Phenomenon, there are few studies that study geography as varied as an Andean basin and represent the data on the ground. The present study applies the calculation of the standardized precipitation index (SPI) on 17 rainfall stations in the river basin with a 12-month window that is recommended for water resources management. The values of drought were analyzed in three time intervals 1985 - 1989, 1990 - 1994 and 2000 - 2004 corresponds to the driest periods. The results are shown on the ordinary Kriging interpolation maps generated from the SPI and with error values within the recommended parameters, thus being the driest months are those expected according to previous studies, except in the month of May 1985 that has an SPI of -1.32 on average, the driest of the periods*

analyzed, which leads to consider the influence Of larger scale phenomena capable of modifying rainfall patterns at large scales

Keywords: **Kriging, Paute basin, precipitation, SPI.**

## I. INTRODUCCIÓN

La sequía se define como un desequilibrio temporal natural sobre la disponibilidad de agua, que consiste en una persistente precipitación por debajo de los límites normales, con frecuencia incierta, duración y severidad difícil de predecir, que lleva a la disminución de la disponibilidad de los recursos hídricos y la capacidad de carga de los ecosistemas (Pereira et al., 2002); (Raziei et al., 2009). Al considerarse un evento normal y recurrente del clima puede suceder en cualquier lugar, aunque sus características e impactos varían significativamente de una región a otra (Wilhite, 1997).

La sequía puede originarse debido a tres factores: (a) cambios en la temperatura superficial de los mares y océanos en los que se da un recalentamiento de la superficie del mar, dando como resultado una alteración general de la atmósfera, (b) existencia de una capa de polvo espesa en la atmósfera, la cual impide que la Tierra se enfríe, dando como resultado un aumento lento pero constante de la temperatura, esta capa de polvo se origina debido a la erosión eólica, y (c) la quema de combustibles fósiles, el cambio de uso del suelo y la actividad antropogénica que contribuyen a la modificación de la atmósfera dando como resultado alteraciones en los patrones de precipitación. En el Ecuador, las sequías se originan debido a situaciones climáticas anómalas como son: (a) la situación septentrional anómala ocasionada por la corriente fría de Humboldt, (b) La influencia del fenómeno del Niño sobre los regímenes hidro-pluviométricos del Ecuador, en la cual las precipitaciones se ven afectadas y (c) situación anticiclónica que bloquea la acción de los frentes, sistemas convectivos y depresiones, como es el caso de la sierra ecuatoriana y de las estribaciones orientales de la cordillera (Cadier et al., 1997; Rossel, 1997). Además se ha determinado una relación entre la lluvia del Ecuador y algunos índices climáticos como la Temperatura Superficial del Mar (TSM), el Índice Oceánico del Niño (ONI) y el Índice de Oscilación Sur (IOS) (Rossel, 1997).

La sequía puede tener graves consecuencias, debido a que puede dar lugar a pérdidas por rendimiento agrícola y escasez de agua (Austin et al., 1998; Quiring & Papakryiakou, 2003), así como causar daños a ecosistemas naturales y forestales a más de contribuir a la degradación del suelo y la desertificación, incluso existe la probabilidad de que los efectos del cambio climático incrementen los niveles de severidad de la sequía, dando como resultado un incremento en la escasez de agua lo que tendría un impacto devastador sobre la agricultura y el suministro de agua para consumo humano (Nicholson et al., 1998; Pickup, 1998).

Las sequías son aún más graves en cuencas deficitarias de agua donde el crecimiento de la población, la expansión de las áreas agrícolas, el aumento de la demanda energética y el incremento de las industrias demandarán más recursos hídricos (Avilés et al., 2015). Las regiones de montaña como ecosistemas importantes que proveen recursos y servicios a las comunidades de montaña y los residentes de las tierras bajas (Beniston, 2003) no están exentas de esta realidad, puesto que la alta variabilidad de la lluvia y los efectos del cambio climático en cuencas de montaña pueden traer largos periodos de sequía (Buytaert et al., 2006).

Con el fin de disminuir los efectos de este fenómeno, es necesario conocer sus características como el inicio del evento, la

extensión de territorio que se ve afectada y la gravedad de la misma (Dalezios et al., 2000). Aunque en la actualidad existen estudios que analizan el comportamiento de este fenómeno sobre diferentes escenarios (Barbeta et al., 2015; Buttafuoco et al., 2015; Cook, Ault, & Smerdon, 2015; Lloyd-Hughes & Saunders, 2002; Maystadt & Ecker, 2014), es un caso de interés especial el de las cuencas andinas (Avilés et al. 2016; Alex Avilés et al., 2015) debido a la particularidad de su geografía, sin embargo estas investigaciones no consideran el componente espacial como un producto cartográfico que permita apreciar sobre el territorio la severidad de los eventos de sequía como es el objetivo del presente trabajo.

A fin de caracterizar los niveles de importancia de la sequía, en la comunidad de gestores se usa ampliamente información expresada en un marco de índices (Shukla & Wood, 2008), éstos son útiles para identificar, localizar, cuantificar, monitorear y evaluar estos fenómenos ya que no sólo facilitan el conocimiento de estas anomalías climáticas a diversos usuarios; sino que también permite evaluarlas cuantitativamente en función de su intensidad, duración, frecuencia, probabilidad de recurrencia y extensión espacial (Tsakiris et al., 2007; Wilhite et al., 2000). Esta información resulta muy útil para la planificación y diseño de sistemas de gestión de recursos hídricos.

La mayoría de los índices se basan en variables meteorológicas o hidrológicas, entre estos se incluyen: Índice de Severidad de Sequía de Palmer (PDSI) (Palmer, 1965) basado en la precipitación y temperatura, mide la duración, intensidad y extensión espacial de la sequía, además es uno de los pocos índices estandarizados que facilita la comparación directa entre PDSI de diferentes regiones, su máxima limitación radica en que el índice está basado en reglas y supuestos arbitrarios (Avilés et al., 2015; Mishra & Singh, 2010), Índice de Humedad de la Cosecha (CMI; (Palmer, 1968)), Índice de Sequía de Bhalme y Mooley (BMDI; (Bhalme & Mooley, 1980)), el Índice de caudal estandarizado (SSI), permite monitorear las sequías hidrológicas, el método para su cálculo es similar al del SPI, por lo que tiene la ventaja de poder calcularse para varias ventanas de tiempo, su desventaja reside en el uso exclusivo de los datos de caudal (Vicente-Serrano et al., 2011) y, el Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) (McKee, Doesken, Kleist, & others, 1993) aplicado más ampliamente en diferentes países del mundo (Vicente-Serrano, 2006; Wilhite et al., 2000; Zhai & Feng, 2009) se puede considerar como el índice más robusto y eficaz debido a que es posible calcularlo para diferentes escalas de tiempo y analizarlo por categorías de sequía (Capra et al., 2013; Capra & Scicolone, 2012), se basa únicamente en la precipitación (Vicente - Serrano 2006 ; Wu et al., 2005) y se ajusta a una función de probabilidad gamma que posteriormente se transforma en una distribución de probabilidad normal estandarizada, su principal ventaja radica en que puede calcularse para una gran variedad de ventanas de tiempo, es uno de los métodos más sencillos de efectuar y se encuentra entre los índices más usados para el pronóstico de sequías (Avilés et al., 2015). Debido a su naturaleza intrínseca probabilística, el SPI es ideal para llevar a cabo el análisis del riesgo de sequía (Guttman, 1999) su desventaja radica en el uso únicamente de la precipitación para la obtención del índice (McKee et al., 1993).

Debido a que la información de base para el SPI proviene de estaciones meteorológicas, muchas veces limitadas en canti-

dad y distribución, para fines de monitoreo, resulta útil trabajar con mapas que muestren la severidad de la sequía sobre una región obtenidos a partir de puntos de medición y los valores en lugares sin muestrear se pueden calcular a partir de las estaciones existentes.

La geoestadística es una combinación de métodos que permiten estimar el valor de una propiedad en un punto local donde no hay medición y sus métodos son muy convenientes para realizar este tipo de análisis a nivel espacial (Webster & Oliver, 2007; Zhang, Zhang, & Yao, 2009). Esta rama de la estadística aplicada se especializa en el análisis y la modelación de la variabilidad espacial en ciencias de la tierra. Su objeto de estudio es el análisis y la predicción de fenómenos en espacio y/o tiempo tomando en cuenta la autocorrelación espacial y direccional de los datos (Webster & Oliver, 2007). A diferencia de los métodos de interpolación determinísticos que se basan en funciones matemáticas, los métodos geoestadísticos (Kriging y Cokriging) se basan en métodos estadísticos y matemáticos que permiten crear superficies y evaluar la incertidumbre de las predicciones que se realicen. (Johnston, Ver Hoef, Krivoruchko, & Lucas, 2003) y pueden ser usados para generar mapas de distribución espacial mediante los sistemas de información geográfica (SIG) tal como han realizado algunos autores (Buttafuoco et al., 2015; Kamali, Nazari, & Faridhosseini, 2015).

**II. MÉTODO**

**A. ÁREA DE ESTUDIO**

La investigación se realiza en Ecuador, en la cuenca del río Paute (CRP) (figura 1), zona localizada al sur de los Andes ecuatorianos, en una región de depresión interandina, entre los 2° 15' y 3° 15' latitud sur; y, los 78° 30' y 79° 20' longitud oeste. Esta cuenca está delimitada hacia el norte por el nudo de Curique que divide la hoya del Cañar con la hoya del Paute; hacia el sur por el nudo del Portete, que divide la hoya del Jubones con la del Paute; hacia el este por la cordillera Oriental de los Andes que divide la región del Oriente con la Sierra; y hacia el oeste por la cordillera Occidental de los Andes, que divide la región de la Sierra con la Costa. El área de la cuenca tiene una extensión aproximada de 6.442 km², su altitud varía desde 440 m.s.n.m. hasta 4.680 m.s.n.m. A pesar de sus altitudes no presenta nevados o glaciares, debido a su proximidad al eje ecuatorial por lo que se presentan solo dos estaciones: La seca y la húmeda (Celleri et al., 2007).

El análisis de los eventos de sequía se realizó a partir de la precipitación media mensual en la cuenca considerando 17 estaciones (figura 1) con series históricas de enero de 1980 a diciembre 2010 provistas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI). El Índice de Precipitación Estandarizada (SPI) es la herramienta principal para definir y monitorear eventos de sequía. Al evaluar períodos cortos (1 a 6 meses) se estima la sequía que afecta a la vegetación y prácticas de agricultura, los períodos de 12 o 24 meses describen la sequía que se debe tomar en cuenta para manejo de recursos hídricos (Avilés et al., 2015; Bonaccorso et al., 2003; Edwards, 1997).

En el presente estudio se calculó el SPI para ventanas de tiempo de 12 meses, teniendo en cuenta que el valor categoriza este evento incluyendo períodos de humedad como se muestra en la tabla I (Mishra & Desai, 2005). Para obtener el SPI se debe definir el nivel de agrupación de los registros de datos, estos pueden ser mensual, bimensual, trimestral, semestral, etc., de esta manera se forman los SPI como SPI1,

SPI2, SPI3, SPI6, SPI12, SPI24, (Paredes, Millano, & Guevara, 2008), es decir, si se desea obtener el índice SPI12, implica que debe calcularse para cada punto de medida el valor acumulado anual. Debido a que los datos de precipitación no describen una distribución normal, las series de datos se ajustaron a una función de probabilidad gamma para el cálculo del SPI (Guttman, 1999) y (Younes et al., 2011). La distribución función de densidad de probabilidad gamma es la descrita por (Mishra & Desai, 2005):

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta} \tag{1}$$

Donde  $\alpha$  es un parámetro de forma de la curva ( $\alpha > 0$ ),  $\beta$  es un parámetro de escala ( $\beta > 0$ ),  $x$  es la cantidad de precipitación ( $x > 0$ ) y  $\Gamma(\alpha)$  es la función gamma.

**TABLA I**  
CLASIFICACIÓN CLIMÁTICA SEGÚN EL ÍNDICE SPI

VALOR SPI	NIVEL DE AFECTACIÓN
$\geq 2.00$	Humedad extrema
$1.5 \leq \text{SPI} < 2.00$	Muy húmedo
$1.00 \leq \text{SPI} < 1.50$	Humedad moderada
$-1.00 \leq \text{SPI} < 1.00$	Cercano a normal
$-1.5 \leq \text{SPI} < -1.00$	Sequía Moderada
$-2.00 \leq \text{SPI} < -1.50$	Sequía severa
$\text{SPI} < -2.00$	Sequía extrema

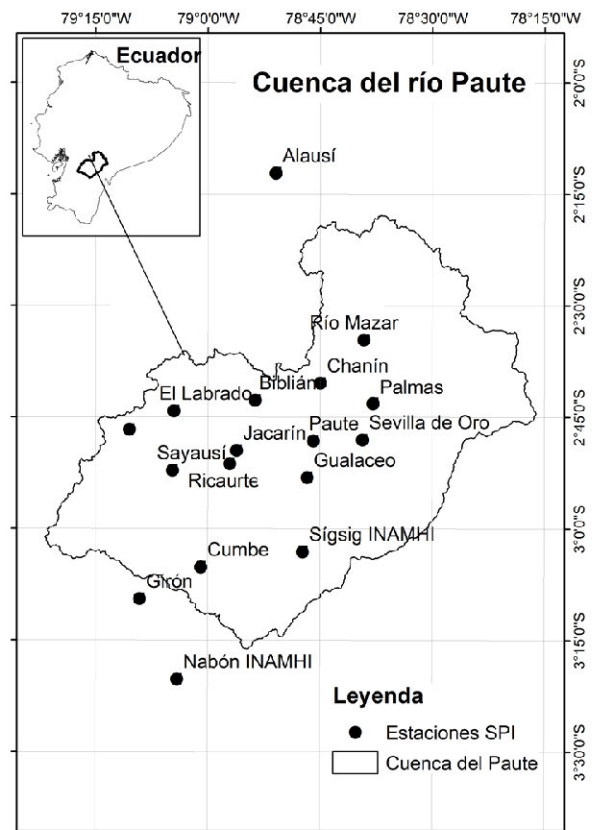


Figura 1. Ubicación de las estaciones de precipitación en la Cuenca del río Paute

El conjunto de datos SPI 12 por estación (Anexo 1) se ajustó de probabilidad gamma a normal mediante funciones del software R Studio. Los valores en zonas no muestreadas se obtuvieron a partir de procesos geoestadísticos realizados con

el software ArcGis, a través del método Kriging Ordinario en donde se modela la precipitación como un proceso intrínsecamente estacionario (Webster & Oliver, 2007) y sin tendencia definido por la ecuación [2].

$$Z_1(s) = \mu_1(s) + \varepsilon_1(s) \quad (2)$$

donde  $Z_1(s)$  es la variable de interés;  $\mu_1(s)$  es una constante desconocida y  $\varepsilon_1(s)$  son los errores aleatorios,  $(s)$  indica las coordenadas  $x$  e  $y$  (Moreno Jiménez & Cañada Torrecilla, 2006) en donde cada valor SPI corresponde a la coordenada  $z$  de su localización para cada punto medido. El conjunto de estos valores forman una función randómica que se la conoce como variable regionalizada (Webster & Oliver, 2007), (Goovaerts, 1997).

El objetivo de la geoestadística es explorar y cuantificar el patrón espacial que describe una variable regionalizada, con este fin se emplea el variograma experimental el cual es una función del vector distancia de los pares de valores, esta función está definida por la siguiente ecuación (Moreno Jiménez & Cañada Torrecilla, 2006; Webster & Oliver, 2007):

$$\gamma(s_i, s_j) = 0.5 * \text{promedio}(Z(s_i) - Z(s_j)) \quad (3)$$

Donde  $s_i$  y  $s_j$  son los valores medidos en el lugar  $i$  y  $j$ , el promedio se debe a que se agrupan las distancias en un determinado número de intervalos. El cálculo de las distancias entre dos lugares se lo realiza mediante la ecuación de la distancia euclidiana (Moreno Jiménez & Cañada Torrecilla, 2006). Posteriormente, se ajusta el modelo del variograma que es una función teórica, al semivariograma experimental que permite estimar el variograma analíticamente para cualquier distancia. El modelo del variograma que se emplee (gaussiano, experimental, exponencial, entre otros) requiere de parámetros para ajustarse (pepita, rango y meseta), además de considerar el criterio de vecindad por la forma que describe la búsqueda (elipse al mantener anisotropía) y el número de vecinos para la interpolación (Webster & Oliver, 2007). En este estudio el variograma para todos los años se ajustó al modelo esférico, uno de los adecuados debido a la naturaleza de la variable (P. Goovaerts, 2000).

**TABLA II**  
Parámetros de ajuste del variograma experimental

MESES MÁS SECOS	PEPITA	MESETA	RANGO	DIRECCIÓN
Mayo 1985	55253	85454	72862	24
Noviembre 1985	73188	158197	72874	15
Julio 1990	834.3	6006.3	20308	10
Agosto 1992	5666	36644	107776	64
Septiembre 2002	1866	3688	46686	65
Junio 2002	20261	37493	98860	72

El ajuste óptimo del modelo está determinado por validación cruzada, que consiste en revisar la compatibilidad entre el conjunto de datos y el modelo estructural, para cada modelo,  $Z$  se estima a partir de los datos y el modelo Kriging en cada punto de muestreo, luego se excluye temporalmente el valor muestral en ese punto y se considera la información de un vecino para estimar el valor de la variable en esa localización. Las estimaciones se comparan con el valor medido a través de medidas estadísticas que permiten determinar el error en la interpolación (Moreno Jiménez & Cañada Torrecilla, 2006; Webster & Oliver, 2007), entre las medidas están:

Error medio cuadrático estandarizado:

$$EMCS = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{(\hat{Z}(s_i) - z(s_i))}{\hat{\sigma}(s_i)} \right]^2}{n}} \quad (4)$$

Error medio estandarizado:

$$EMS = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Z}(s_i) - z(s_i)) / \hat{\sigma}(s_i)}{n} \quad (5)$$

El EMS debe ser cercano a 0, esto debido a que el modelo aplicado no tiene sesgo, sin embargo, no es una medida robusta para el diagnóstico ya que Kriging no es sensible a las inexactitudes del semivariograma, pero se prefiere un EMS lo más pequeño posible (Webster & Oliver, 2007). El EMCS debe ser cercano a uno, si es mayor que uno, indica que la variabilidad de la predicción ha sido infraestimada y si es menor que uno, se ha sobrestimado la variabilidad (Moreno Jiménez & Cañada Torrecilla, 2006). En la tabla II se indican los parámetros de ajuste para las estimaciones y los errores producidos.

### III. RESULTADOS

A partir de los valores de precipitación media mensual se determinó de los valores SPI para una ventana de 12 meses y aplicando Kriging Ordinario se generó los mapas de sequía para la cuenca del río Paute con las siguientes características: variograma esférico, anisotropía, vecindad en máximo 5 y mínimo 2 sobre una elipse de 4 transectos.

De las series de datos 1980 - 2010 se identificaron los períodos más secos de acuerdo al índice SPI por grupos de 5 años como se observa en el anexo 1, a partir de esos grupos se generaron los mapas tomando en cuenta los dos meses más secos en promedio por grupo siendo así: Mayo 1985 (figura 2) y Noviembre 1985 (figura 3) para el período 1985 - 1989 con SPI de -1.32 y -1.30 respectivamente, Julio 1990 (figura 4) y Agosto 1992 (figura 5) para el período 1990 - 1994 con sequías de -1.15 y -1.12 respectivamente, y; para el período 2000 - 2004, Septiembre 2002 (figura 6) con SPI -0.96 y Junio 2002 (figura 7) con SPI -0.89, las figuras a continuación muestran los cantones afectados por los eventos de sequía

Para el caso de Mayo de 1985, el modelo Kriging se obtuvo con un EMS de -0.048 y un EMCS de 0.94. La figura 2 muestra que la parte alta y media de la cuenca del Paute es la más afectada por eventos de sequía severa. La escala SPI presenta en promedio un valor de -1.32, un solo valor positivo en Sevilla de Oro con 1.42 que corresponde al rango de humedad moderada pero esta clasificación no se ve graficada debido a la influencia de algunos vecinos como Alausí y Jacarín que registran un SPI de -2.31 y -2.57 respectivamente.

Para Noviembre de 1985, el segundo mes más seco del período 1985 - 1989, el modelo Kriging se obtuvo con un EMS de -0.05 y un EMCS de 0.87.

En la figura 3 se observa que presenta sequía extrema en la parte alta de la cuenca, Jacarín con -2.99, El Labrado -2.36, Sayausí con -2.34 y Biblián con -1.35. Únicamente se presenta un punto con valor de humedad moderada en Sevilla de Oro con SPI 1.60.

En Julio de 1990, figura 4, el primer mes más seco en promedio del período 1990 - 1994 con SPI -1.15, el modelo Kriging se

obtuvo con un EMS de -0.06 y un EMCS de 0.91. En la figura 4 se observa que presenta sequía extrema en la parte alta (Saysú con SPI -2.85 y El Labrado con -1.42) y una sección de la parte media de la cuenca (Biblián con SPI -1.92, Paute con -1.74 y Chanín con -1.56). En este mes no se registran valores positivos de sequía.

En la figura 5 se muestra, el segundo mes en promedio más seco del período 1990 - 1994 con un SPI de -1.12, la parte baja de la cuenca del Paute es la más afectada por eventos de se-

quía moderada. Para este caso el modelo Kriging se obtuvo con un EMS de -0.06 y un EMCS de 1.23. El valor de mayor sequía corresponde a la estación de Palmas con -1.95 en el cantón Sevilla de Oro, y al noroccidente del cantón Cuenca, la estación Piscícola Chirimichay con -1.68.

Para el período 2000 - 2004, el mes más seco en promedio fue Septiembre de 2002 con SPI de -0.96, siendo Ricaurte el registro más bajo con -1.99, le siguen Alausí con -1.56, Palmas con -1.41, Paute y Piscícola Chirimichay con -1.35 cada una. Nueve

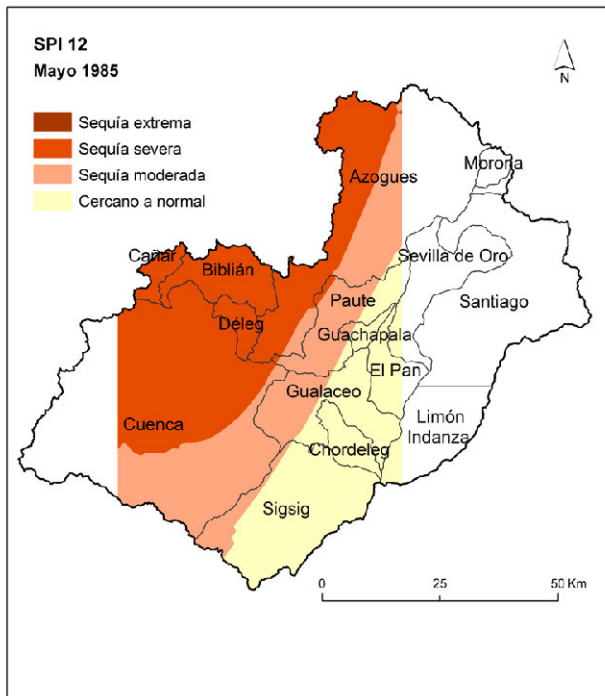


Figura. 2. SPI 12 en el mes de Mayo de 1985.

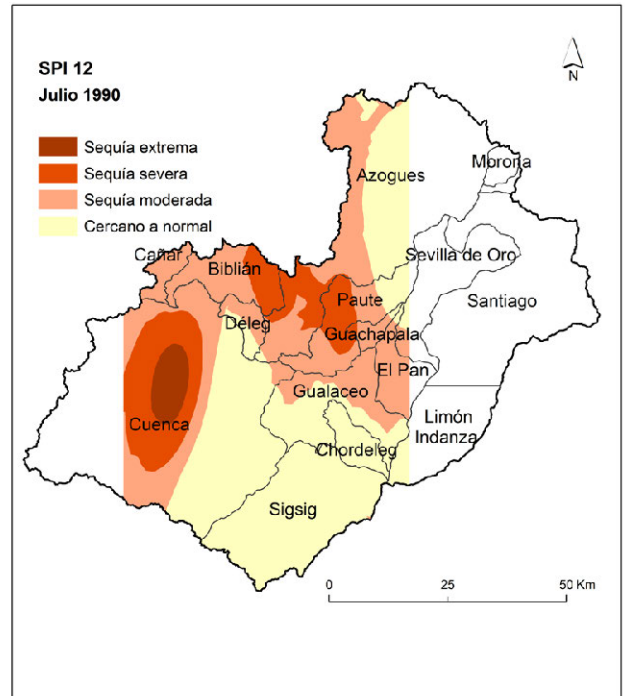


Figura. 4. SPI 12 en el mes de Julio de 1990.

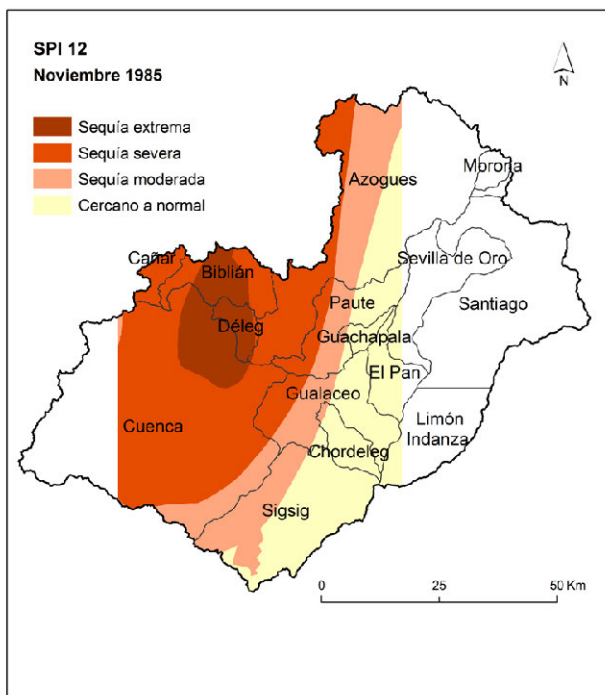


Figura. 3. SPI 12 en el mes de Noviembre de 1985.

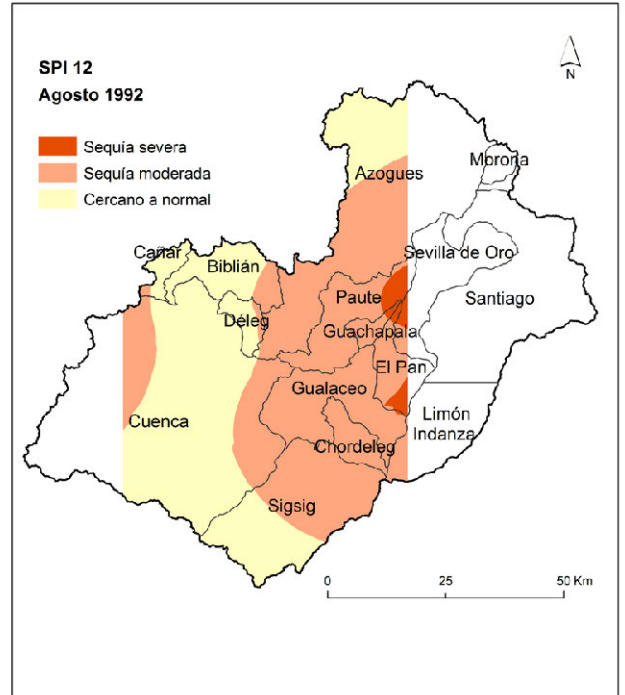


Figura. 5. SPI 12 en el mes de Agosto de 1992.

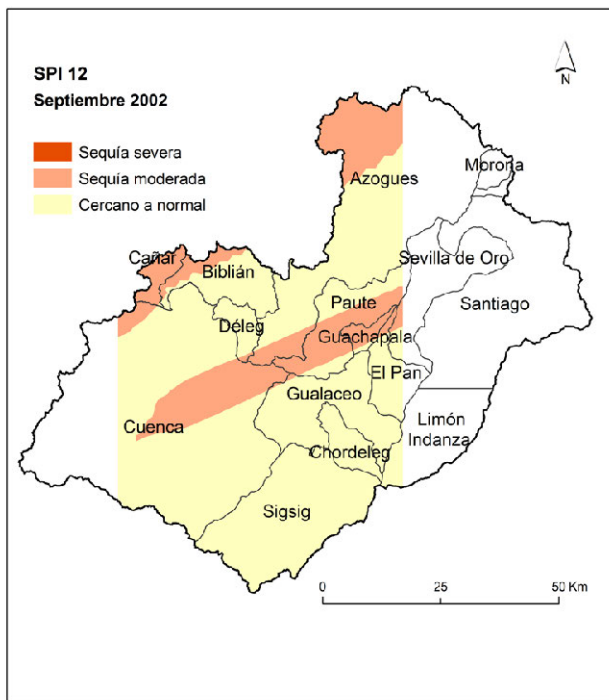


Figura. 6. SPI 12 en el mes de Septiembre de 2002.

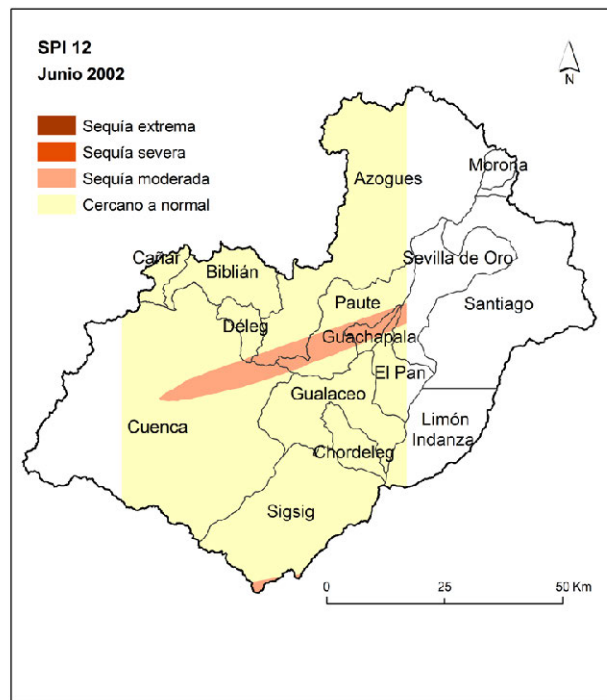


Figura. 7. SPI 12 en el mes de Junio de 2002.

de los valores SPI en este mes se mantienen en el rango cercano a normal como se muestra en la figura 6.

La figura 7 muestra Junio 2002, el segundo mes más seco del período 2000 - 2004, con un SPI de -0.89 en promedio.

Como se observa en la figura 7, existen sólo dos tipos de sequía: moderada y cercano a normal. Esto se debe a que la estación con mayor sequía es Ricaurte con -2.11, Alausí con -1.80 y Nabón con -1.59 y le siguen Palmas con -1.40 y Paute con -1.18. En este mes, 12 de los 17 valores SPI tienen un registro cercano a normal.

#### IV. CONCLUSIONES

El estudio se enfocó en un análisis exploratorio de las sequías en la cuenca del Paute para una ventana de 12 meses que muestra sequía para niveles de gestión de recursos hídricos durante el período 1980 - 2010, teniendo en cuenta que el índice SPI 12 se calculó con base en la precipitación media de cada una de las 17 estaciones de la cuenca del Paute.

Los datos SPI 12 se calcularon observando una distribución gamma ajustada a una normal con el fin de aplicar Kriging para estimar los valores de sequía en los puntos no muestreados. Los parámetros de ajuste del semivariograma empírico al modelo experimental se realizaron de manera que las superficies generadas presenten mapas sin saltos inexplicables en la interpolación y a través de la validación cruzada los EMS y EMCS estén dentro de los valores permitidos, es decir, cercanos lo más posible a cero y a uno respectivamente. Cabe mencionar que si bien se encontraron parámetros que redujeron las medidas de error como el criterio de vecindad por ejemplo, estos generaron superficies que no están acorde a la realidad del terreno.

Se tomaron en cuenta 3 períodos de análisis para el SPI 12, 1980 - 1984, 1990 - 1994 y 2000 - 2004, ya que en estos se de-

teció los períodos más secos, siendo el mes de Mayo de 1985 el más seco con un SPI de -1.32 y el menos seco Junio de 2002 con -0.89. A pesar de existir datos que muestran humedad moderada como en el caso de la estación Sevilla de Oro en Mayo y Noviembre de 1985 con valores de 1.42 1.60 respectivamente, éstos no se ven reflejados en los mapas por la condición de los vecinos al momento de la interpolación, los puntos que rodean esta estación tienen una clasificación que va de sequía severa a normal, y es precisamente de todos los meses, el de Mayo de 1985 el que llama más la atención pues no coincide con estudios previos realizados sobre precipitación como Celleri (2007) en donde la zona que describe sequía se muestra como de las que más llueve, esto puede deberse a un mes y año atípico dentro de la serie de datos debido a fenómenos que modifican la lluvia a gran escala.

Un problema de aplicar un índice de sequía basado únicamente en datos de precipitación se vio reflejado en el hecho de que no es posible, dentro de este índice, considerar variables que influyen en la precipitación como altitud, temperatura, pendiente entre otros (P. Goovaerts, 2000), a pesar de esta limitación, los mapas coinciden con las épocas de menor precipitación señalados en (Celleri et al., 2007) y el índice SPI 12 es el adecuado para el análisis a nivel macro (A Avilés et al., 2016), sin embargo, los patrones de variabilidad temporal y espacial de la sequía en la cuenca del Paute que podrían explicarse más claramente si se analizaran en conjunto con datos de patrones climáticos sinópticos que se presentan en la región montañosa occidental influenciada por el régimen costero del Pacífico y en la región montañosa oriental influenciada por las masas de aire tropicales húmedas provenientes de la Amazonía y del Atlántico (Vuille et.al, 2000).



**AGRADECIMIENTOS**

Al Vicerrectorado de Investigaciones de la Universidad del Azuay y al Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador por el financiamiento y apoyo. Al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) por la provisión de los datos.

**REFERENCIAS**

- Austin, R. B., Cantero-Martínez, C., Arrúe, J. L., Playán, E., & Cano-Marcellán, P. (1998). Yield-rainfall relationships in cereal cropping systems in the Ebro river valley of Spain. *European Journal of Agronomy*, 8(3), 239-248.
- Avilés, A., Céleri, R., Paredes, J., & Solera, A. (2015). Evaluation of Markov Chain Based Drought Forecasts in an Andean Regulated River Basin Using the Skill Scores RPS and GMSS. *Water Resources Management*, 29(6), 1949-1963. <http://doi.org/10.1007/s11269-015-0921-2>
- Avilés, A., Céleri, R., Solera, A., & Paredes, J. (2016). Probabilistic Forecasting of Drought Events Using Markov Chain and Bayesian Network-Based Models: A Case Study of an Andean Regulated River Basin. *Water*, 8(37), 1-16.
- Barbeta, A., Mejía-Chang, M., Ogaya, R., Voltas, J., Dawson, T. E., & Peñuelas, J. (2015). The combined effects of a long-term experimental drought and an extreme drought on the use of plant-water sources in a Mediterranean forest. *Global Change Biology*, 21(3), 1213-1225.
- Beniston, M. (2003). Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts. *Climatic Change*, 59(1), 5-31.
- Bhalme, H. N., & Mooley, D. A. (1980). Large-scale droughts/floods and monsoon circulation. *Monthly Weather Review*, 108(8), 1197-1211.
- Bonaccorso, B., Bordi, I., Cancelliere, A., Rossi, G., & Sutera, A. (2003). Spatial variability of drought: an analysis of the SPI in Sicily. *Water Resources Management*, 17(4), 273-296.
- Buttafuoco, G., Caloiero, T., & Coscarelli, R. (2015). Analyses of drought events in Calabria (Southern Italy) using standardized precipitation index. *Water Resources Management*, 29, 557-573.
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 413-421. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Cadier, É., Gornez, G., Calvez, R., & Rossel, F. (1997). Inundaciones y Sequias en el Ecuador: el proyecto INSEQ. Quito.
- Capra, A., Consoli, S., & Scicolone, B. (2013). Long-term climatic variability in Calabria and effects on drought and agrometeorological parameters. *Water Resources Management*, 27(2), 601-617.
- Capra, A., & Scicolone, B. (2012). Spatiotemporal variability of drought on a short-medium time scale in the Calabria Region (Southern Italy). *Theoretical and Applied Climatology*, 110(3), 471-488.
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space - time rainfall variability in the Paute Basin, Ecuadorian Andes. *Wiley InterScience*, 3327(August), 3316-3327. <http://doi.org/10.1002/hyp>
- Cook, B. I., Ault, T. R., & Smerdon, J. E. (2015). Unprecedented 21st century drought risk in the American Southwest and Central Plains. *Science Advances*, 1(1), e1400082.
- Dalezios, N. R., Loukas, A., Vasilades, L., & Liakopoulos, E. (2000). Severity-duration-frequency analysis of droughts and wet periods in Greece. *Hydrological Sciences Journal*, 45(5), 751-769.
- Edwards, D. C. (1997). Characteristics of 20th century drought in the United States at multiple time scales.
- Goovaerts, P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press on Demand.
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228(1-2), 113-129. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00144-X](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00144-X)
- Guttman, N. B. (1999). Accepting the Standardized Precipitation Index: a Calculation Algorithm. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 35(2), 311-322. <http://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1999.tb03592.x>
- Johnston, K., Ver Hoef, J. M., Krivoruchko, K., & Lucas, N. E. (2003). *Using ArcGIS Geostatistical Analyst*.
- Kamali, M., Nazari, R., & Faridhosseini, A. (2015). The Determination of Reference Evapotranspiration for Spatial Distribution Mapping Using Geostatistics. *Water Resources ...*, 29, 3929-3940.
- Lloyd-Hughes, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22(13), 1571-1592. <http://doi.org/10.1002/joc.846>
- Maystadt, J.-F., & Ecker, O. (2014). Extreme weather and civil war: Does drought fuel conflict in Somalia through livestock price shocks? *American Journal of Agricultural Economics*, 96(4), 1157-1182.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., & others. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology* (Vol. 17, pp. 179-183).
- Mishra, A. K., & Desai, V. R. (2005). Drought forecasting using stochastic models. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 19(5), 326-339. <http://doi.org/10.1007/s00477-005-0238-4>
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1), 202-216.
- Moreno Jiménez, A., & Cañada Torrecilla, R. (2006). *Sistemas y Análisis de la Información Geográfica*.
- Nicholson, S. E., Tucker, C. J., & Ba, M. B. (1998). Desertification, drought, and surface vegetation: an example from the West African Sahel. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5), 815-829.
- Palmer, W. C. (1965). *Meteorological Drought*. U.S. Weather Bureau, Res. Pap. No. 45.
- Palmer, W. C. (1968). Keeping track of crop moisture conditions, nationwide: The new crop moisture index.
- Paredes, F., Millano, J. L., & Guevara, E. (2008). Análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de Los Llanos de Venezuela durante el período 1961-1996. *Revista de Climatología*, 8.

Pereira, L. S., Cordery, I., & Iacovides, I. (2002). Coping with Water Scarcity.(IHP? VI, Technical Documents in Hydrology, n° 58). Paris. International Hydrological Programme, UNESCO.

Pickup, G. (1998). Desertification and climate change--the Australian perspective. *Climate Research*, 11(1), 51-63.

Quiring, S. M., & Papakryiakou, T. N. (2003). An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agricultural and Forest Meteorology*, 118(1-2), 49-62. [http://doi.org/10.1016/S0168-1923\(03\)00072-8](http://doi.org/10.1016/S0168-1923(03)00072-8)

Raziei, T., Saghafian, B., Paulo, A. A., Pereira, L. S., & Bordi, I. (2009). Spatial patterns and temporal variability of drought in western Iran. *Water Resources Management*, 23(3), 439-455.

Rossel, F. (1997). Influencia de El Niño sobre los regímenes hidro-pluviométricos del Ecuador, serie INSEQ No.18, tomos I, II y III. INAMHI-ORSTOM.

Shukla, S., & Wood, A. W. (2008). Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought. *Geophysical Research Letters*, 35(2), 1-7. <http://doi.org/10.1029/2007GL032487>

Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5), 821-833.

Vicente-Serrano, S. M. (2006). Differences in spatial patterns of drought on different time scales: an analysis of the Iberian Peninsula. *Water Resources Management*, 20(1), 37-60.

Vicente-Serrano, S. M., López-Moreno, J. I., Beguer\ia, S., Lorenzo-Lacruz, J., Azorin-Molina, C., & Morán-Tejeda, E. (2011). Accurate computation of a streamflow drought index. *Journal of Hydrologic Engineering*, 17(2), 318-332.

Vuille, M., Bradley, R. ., & Keimig, F. (2000). Climate variability in the andes of Ecuador and its relation to tropical Pacific and Atlantic sea surface temperature anomalies. *Journal of Climate*, 13, 2520-2535.

Webster, R., & Oliver, M. (2007). *Geostatistics for Environmental Scientists* (Second Edi). John Wiley & Sons, Ltd.

Wilhite, D. A. (1997). Responding To Drought: Common Threads From the Past, Visions for the Future. *Journal of the American Water Resources Association*, 33(5), 951-959. <http://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1997.tb04116.x>

Wilhite, D. A., Hayes, M. J., & Svoboda, M. D. (2000). Drought monitoring and assessment: status and trends in the United States. In *Drought and drought mitigation in Europe* (pp. 149-160). Springer.

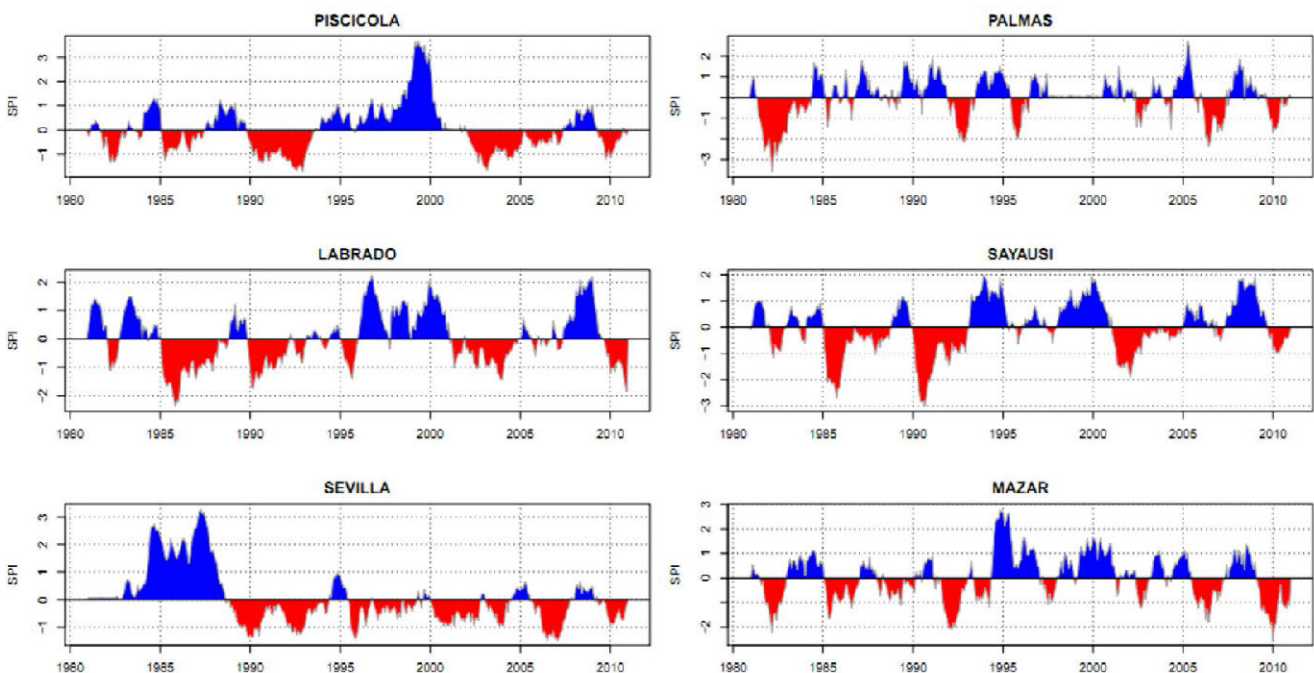
Younes, K., Ali, M. G., Esmail, A., & Fatemeh, T. (2011). Assessment of geostatistical methods for spatial analysis of SPI and EDI drought indices. *World Applied Sciences Journal*, 15(4), 474-482. <http://doi.org/10.1002/joc.1691>

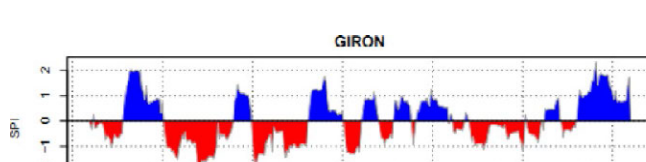
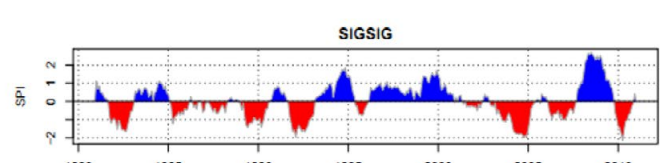
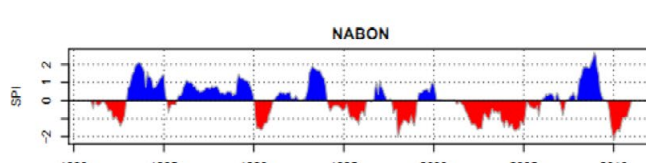
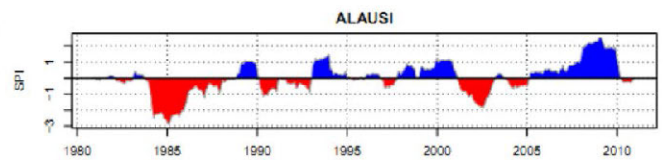
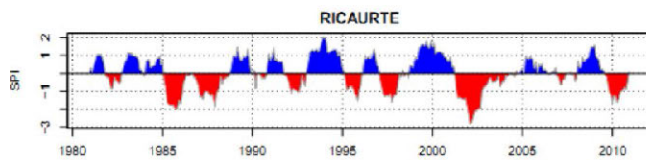
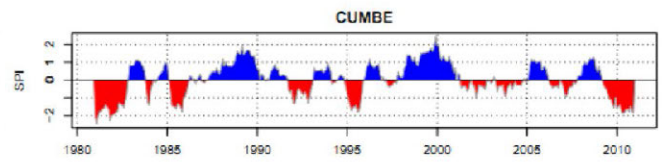
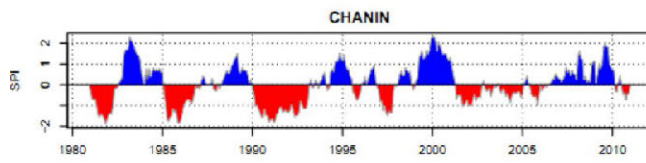
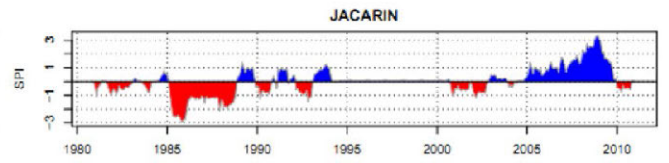
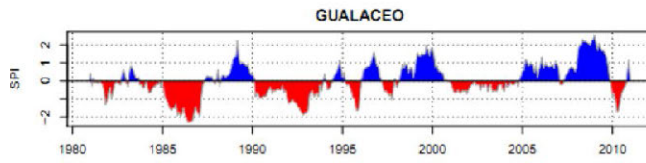
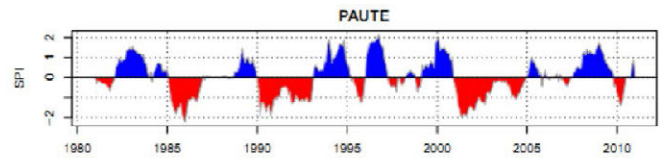
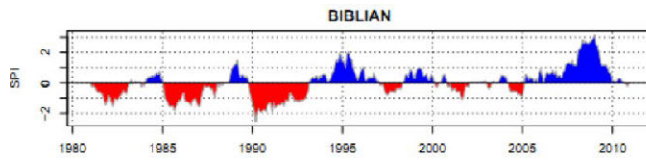
Zhai, L., & Feng, Q. (2009). Spatial and temporal pattern of precipitation and drought in Gansu Province, Northwest China. *Natural Hazards*, 49(1), 1-24.

Zhang, J., Zhang, J., & Yao, N. (2009). Geostatistics for spatial uncertainty characterization. *Geo-Spatial Information Science*, 12(1), 7-12.

## ANEXO 1

SPI de las estaciones de precipitación en la cuenca del río Paute







# Análisis multicriterio basado en GIS para identificar potenciales áreas de emplazamiento de un relleno sanitario mancomunado en la provincia del Azuay

Cobos Sandra<sup>1</sup>, Solano José<sup>2</sup>, Vera Andrés<sup>3</sup>, Monge Juan<sup>3</sup>

1 Unidad Académica de Ingeniería  
Industria y Construcciones / Uni-  
versidad Católica de Cuenca  
General Torres y Ave. Américas/  
Azuay/Ecuador  
scobosm@ucacue.edu.ec

2 Unidad Académica de Ingeniería  
Industria y Construcciones / Uni-  
versidad Católica de Cuenca  
General Torres y Ave. Américas/  
Azuay/Ecuador  
jsolano@ucacue.edu.ec

3 Estudiantes de la Unidad Aca-  
démica de Ingeniería Industria  
y Construcciones / Universidad  
Católica de Cuenca  
General Torres y Ave. Américas/  
Azuay/Ecuador

## RESUMEN

Los sitios de disposición final de desechos sólidos, se constituyen en piezas claves dentro de los procesos de gestión territorial por sus implicaciones ambientales, técnicas, sociales y económicas; más aún en municipios pequeños que no pueden financiar de forma directa este tipo de infraestructuras sanitarias, lo que ocasiona botaderos a cielo abierto, arrendamiento de rellenos sanitarios, o improvisación de lugares que responden a otros factores menos a factibilidad o aptitud del terreno. Tomando en cuenta estos antecedentes, el presente estudio tiene como objetivo identificar potenciales áreas para establecer un relleno sanitario mancomunado para la provincia del Azuay, mediante un análisis de decisión multicriterio (MCDA) con combinación lineal ponderada (WLC), basada en Sistema de Información Geográfica (GIS), de forma que satisfaga los requerimientos impuestos en la normativa vigente. Es así que el 11% de la superficie de la provincia presenta condiciones óptimas para establecer un relleno sanitario básico de 42 Ha., para lo que se contempló solo las ponderaciones más altas del MCDA, correspondientes a valores de 7,8 y 9. Estas zonas se encuentran distribuidas en 13 de los 15 cantones. Sin embargo, las áreas más grandes están en los cantones de Cuenca, Santa Isabel, Nabón, Gualaceo y Oña.

Palabras clave: **Sistemas de Información Geográfica, Análisis de decisión multicriterio (MCDA), Combinación lineal ponderada (WLC), Relleno sanitario mancomunado, Provincia del Azuay.**

## ABSTRACT

*The final solid waste landfill sites are key components of territorial management processes due to their environmental, technical, social and economic implications. Even more so in small municipalities that cannot directly finance this type of sanitary infrastructure, which leads to open pit dumps, landfill leases, or to the implementation of improvised sites in places that respond to other factors, but not to land feasibility or terrain suitability. With this background, the present study aims to identify potential areas for establishing a joint landfill for the Azuay province, by using a multi-criteria decision analysis (MCDA) with weighted linear combination (WLC) and by employing Geographic Information Systems (GIS) as a basic tool, in a way that satisfies the requirements imposed by the current legislation. It holds true that 11% of the province's area has suitable conditions to*

establish a basic sanitary landfill of 42 hectares, for which only the highest MCDA weights corresponding to values of 7,8 and 9 were considered. This zones are distributed in 13 of the 15 cantons. Nevertheless, the largest areas are found in the cantons of Cuenca, Santa Isabel, Nabón, Gualaceo and Oña.

**Keywords:** *Geographical Information Systems, Multicriteria Decision Analysis (MCDA), Weighted Linear Combination (WLC), Landfill Joint, Province of Azuay.*

## I. INTRODUCCIÓN

Los sitios de disposición final marcan el lugar de mayor trascendencia dentro de un sistema integrado de gestión de desechos sólidos, debido a que confluyen actividades que generan grandes impactos ambientales, tal es el caso de desbroce de cobertura vegetal, movimiento de tierra, cambio de uso de suelo, colocación de material de cobertura, manejo de lixiviados, control de emisión de gases, mitigación de impactos paisajísticos y riesgos para la salud pública (Zapata Muñoz & Zapata Sanchez, 2013). A ello se suma problemáticas de carácter global como el crecimiento poblacional, utilización de materiales no biodegradables y el consumo excesivo e innecesario de bienes y productos (Mirabal Silva & Mirabal, 2016). A más de hechos propios de realidades como la latinoamericana, donde se carece de procesos de reaprovechamiento, reciclaje y tratamiento de los residuos. Todo esto contribuye a la generación de una mayor cantidad de basura, que en el mejor de los casos llega a un relleno sanitario. Caso contrario, termina en botaderos a cielo abierto, sin ningún control técnico y ambiental (Sáez & Urdaneta, 2014). Producto de ello, se maximiza el impacto ambiental por contaminación de lugares sensibles con una alta diversidad biológica y de ecosistemas.

A pesar de las consecuencias ambientales, sociales, económicas y culturales que se evidencia, la ubicación del sitio de emplazamiento del relleno sanitario, en Latinoamérica, por lo general, no corresponde principalmente a la factibilidad y aptitud del terreno, sino más bien obedece a factores políticos y sociales, como los que se han discutidos en Quintero (2016). Sin embargo, esta realidad se contrarresta con otros sitios geográficos como por ejemplo España, en donde se cumple, en su mayoría, con las normativas correspondientes (Colomer Mendoza, Altabella, Ferrán García, Herrera Prats, & Robles Martínez, 2013).

Por todas estas implicaciones, una adecuada disposición final de los residuos sólidos urbanos, se contempla como una de las estrategias para alcanzar la sostenibilidad de un territorio, cristalizado a través de los Planes de Ordenamiento Territorial. En el Ecuador, de acuerdo a la Constitución de la República (Asamblea Nacional de la República del Ecuador, 2008) su artículo 264 y al Código orgánico de organización territorial autonomía y descentralización (COOTAD) en su artículo 55, esta responsabilidad ha sido adjudicada a los Gobiernos Autónomos Descentralizados (GADs) Municipales (Ministerio de Coordinación de la Política y Gobiernos Autónomos Descentralizados, 2011), quienes deben controlar, manejar y decidir sobre el uso de los recursos (suelo, aire y agua) de su espacio físico y garantizar la capacidad de enfrentar los conflictos que se deriven de él (Quintero Torres, 2016). Sin embargo, la falta de autonomía administrativa y financiera de estas entidades, ha producido un manejo incipiente de estos desechos (Organización Mundial de la Salud - OMS, 2002; Buenrostro, Mendoza, & López, 2005)

En la provincia del Azuay, se puede evidenciar algunos factores importantes dentro de esta problemática, entre los que se destacan: la aun inadecuada disposición final de los residuos sólidos, donde el 9.19% va a un botadero a cielo abierto,

0.27% va a un botadero controlado y 1.53% utiliza una celda emergente (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2015). Cinco cantones de esta provincia y dos de provincias vecinas, contratan los servicios de disposición final con el GAD municipal de Cuenca a través de su empresa de aseo. Así también, cuatro cantones de la cuenca del Jubones se han organizado a nivel de mancomunidad y cuentan con un relleno sanitario en común.

En base a lo expuesto, la provincia cuenta con dos rellenos sanitarios con licencia ambiental que evidencia el cumplimiento de las normativas técnicas y legales dispuestas en el libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria (TUL-SMA) (Ministerio del Ambiente, 2015). Uno de ellos con una vida útil hasta el 2031 (Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Cuenca, 2016) y el otro hasta el 2023 (Empresa pública municipal mancomunada de aseo integral de la cuenca del Jubones, s.f). Lo que genera la necesidad de establecer nuevas alternativas viables en favor de una planificación territorial adecuada.

Frente a este escenario, una premisa que se asume dentro de este estudio, es la generación de un relleno sanitario mancomunado que toma como actores principales a los GADs municipales de la provincia del Azuay. Hecho que además se fundamenta en el artículo 243 de la Constitución de la República del Ecuador, que menciona "Dos o más regiones, provincias, cantones o parroquias contiguas podrán agruparse y formar mancomunidades, con la finalidad de mejorar la gestión de sus competencias y favorecer sus procesos de integración..." (Asamblea Nacional de la República del Ecuador, 2008). De la misma forma, la Organización Mundial de la Salud (2002), sugiere el trabajo mancomunado para la gestión de residuos sólidos en cantones que no superen los 30000 habitantes, característica que cumplen 13 de los 15 cantones analizados, excluyéndose Cuenca y Gualaceo. Esta estructura organizativa se ha sugerido también en otros países de América Latina (Buenrostro, Mendoza, & López, 2005) debido a beneficios como: reduce costos globales e individuales de gestión del servicio, optimiza y fortalece capacidades instaladas, genera una cultura de responsabilidad y transparencia en la gestión de recursos, mejora la calidad del servicio, estimula la inversión y genera fuentes de trabajo, autonomía técnica, administrativa, económico-financiera y de gestión, centraliza los residuos sólidos en un solo sitio, lo que favorece la operación y disminuye el impacto ambiental (Fundación IPADE, 2011; Solano Peláez, 2011).

El presente estudio tiene como objetivo identificar sitios potenciales para un relleno sanitario mancomunado para la provincia del Azuay, mediante un análisis espacial multicriterio basado en Sistemas de Información Geográfica (GIS). Estos últimos, al ser herramientas poderosas de captura, almacenamiento, consulta, análisis y modelado de información espacial, es la base para estudios territoriales que además ha incluido el álgebra y la probabilidad para apoyar la planificación, el análisis y la toma de decisiones (Malczewski, 2004).

La selección de sitios óptimos, recae en un problema de decisión, ya que gira en torno a la evaluación de diversas varia-

bles que definen según los expertos la idoneidad de un sitio. Esta tarea, en un inicio, se reducía solo al análisis de criterios en el ámbito económico, pero ahora, responden también a factores de tipo técnico, ambiental, social, convirtiéndole al hombre en el factor más importante. Esto ha originado incremento en los volúmenes de información a procesar y en la complejidad del análisis. No obstante, puede ser resuelto en el menor tiempo posible mediante la implementación de la tecnología SIG (Rikalovic, Cosic, & Lazare, 2014)

**II. MÉTODO**

**A. DATOS**

Este estudio partió de información secundaria en el ámbito geográfico, de acuerdo a la Tabla I. Por otro lado, para la determinación del área del relleno sanitario, se obtuvo datos del Programa Nacional de Gestión de Desechos Sólidos del Ministerio del Ambiente del Ecuador (PNGIDS) y de los GADs municipales, quienes proporcionaron la producción per cápita y porcentaje de cobertura.

**TABLA I**  
INSUMOS GEOGRÁFICOS UTILIZADOS EN LA INVESTIGACIÓN

DATOS GEOGRÁFICOS	FUENTE	ESCALA	AÑO
Límites cantonales	IGM	25000	2016
Cuerpos Hídricos		25000	2016
Uso De Suelo		25000	2016
Zonas Edificadas		25000	2016
Isoyetas	ODEPLAN	25000	2002
Permeabilidad	SENPLADES	25000	2014
Material De Cobertura		25000	2014
Modelo Digital De Elevaciones		3m x 3 m	2014
Estabilidad	UDA	25000	2011
Vías	EERCS	2000/5000	2005
Centros Educativos	Ministerio de Educación	25000	2008
Zonas De Bosques Y Áreas Protegidas	MAE	25000	2015
Fallas Geológicas	Caminosca	500	2011

Nota: IGM = Instituto Geográfico Militar, ODEPLAN = Oficina de Planificación, SENPLADES=Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo, UDA = Universidad del Azuay, EERCS = Empresa Eléctrica Regional Centro Sur, MAE = Ministerio del Ambiente del Ecuador

**B. ZONA DE ESTUDIO**

La provincia del Azuay está ubicada al sur del Ecuador, limita al norte con la provincia de Cañar, al sur con Loja, al este con Morona Santiago y Zamora Chinchipe y al oeste con El Guayas y El Oro (Figura 1). Está conformada por 15 cantones divididos en dos demarcaciones hidrográficas (D.H). La D.H del Santiago conformada por los cantones de El Pan, Chordeleg, Gualaceo, Cuenca, Sevilla de Oro, Guachapala, Paute y Sigsig. La D.H del Jubones con los cantones de Oña, Camilo Ponce Enríquez, Nabón, Girón, Pucará, San Fernando y Santa Isabel.

La capital provincial es la Ciudad de Cuenca, Patrimonio Cultural de la Humanidad, que por su extensión territorial y su desarrollo económico, es la tercera ciudad en importancia del País. La provincia, por su ubicación, goza de varios pisos climáticos, lo que genera una alta variedad de ecosistemas y una alta riqueza en biodiversidad. Aquí se destaca el Parque Nacional el Cajas, considerado como reserva de la Biósfera y principal fuente hídrica de la zona.

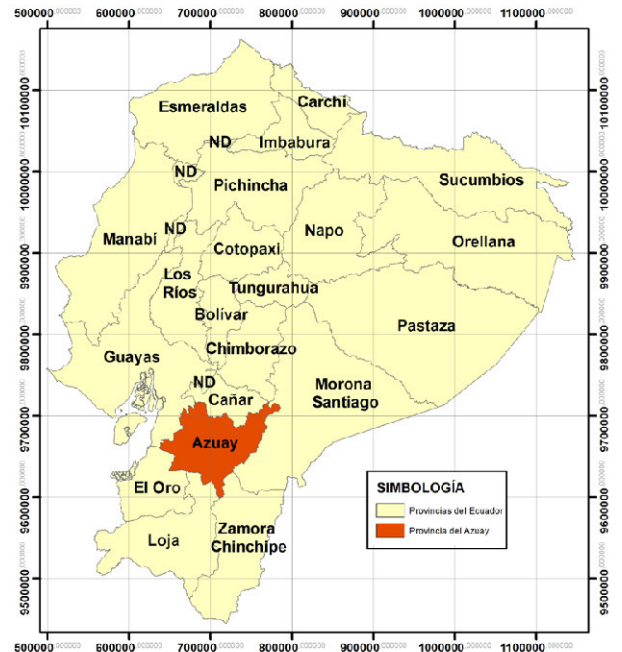


Figura. 1. Mapa de ubicación de la provincia del Azuay.

**C. PROCESO PARA LA DETERMINACIÓN DEL ÁREA REQUERIDA**

El cálculo del área del relleno sanitario se realizó contemplando únicamente los residuos sólidos generados a nivel domiciliario, debido a que representan entre el 80% (Ramos Sánchez, 2016) y 90% (Empresa Municipal de Aseo de Cuenca, 2016) de la producción total. El porcentaje restante se distribuye entre industrias, hospitales, comercios, mercados, establecimientos públicos y privados, residuos de barrido de calles, entre otros. Adicionalmente, no se han considerados los residuos peligrosos, puesto que, estos tienen un tratamiento especial de acuerdo a la normativa ecuatoriana vigente (Ministerio del Ambiente & Ministerio de Salud Pública, 2014).

El tiempo de vida útil para un relleno sanitario de acuerdo a la normativa ambiental ecuatoriana, debe ser de mínimo 10 años (Ministerio del Ambiente, 2015). Desde el punto de vista técnico, se gana estabilidad en la masa de basura a medida que pasan los años (Espinosa Silva & González García, 2011). Para este estudio, al manejarse el criterio de mancomunidad a nivel provincial, se contempla una vida útil de 20 años (Sanchez Bernal, Rodríguez León, Sandoval Orozco, Camacho Escobar, & Estrada Vázquez, 2015), partiéndose desde el 2025, lo que implica una proyección hasta el año 2045. El margen de 7 años (2017-2025) se contempla para la generación de espacios de diálogo con miras a la creación de la mancomunidad, estudios técnicos de viabilidad de las alternativas y la estructura técnico-administrativo del sistema de gestión (Consorcio Público de la Cuenca del Río Jubones, 2013; Alianza por la Solidaridad, 2014 (a,b)).

El cálculo del área necesaria (ARS) se realizó con la ecuación [1].

$$ARS = \left( \sum_{k=1}^{15} A(cub/cantón) \right) * A(adi) \quad (1)$$

Donde A(cub/cantón) es igual al área mínimo requerida para depositar los residuos sólidos de cada cantón hasta el año 2045. Se calculó por medio de la ecuación [2]. La sumatoria

de los 15 cantones, se multiplicó por A(adi) que es un valor referencial que se agrega para obras e infraestructura necesaria para la operación del relleno sanitario, tales como: vías, caseta de guardianía, área de pesaje de camiones, zona de recuperación de flora y fauna, entre otros. Valor que se recomienda entre un 20% y 40% (Carmona Merat, 2015). Para esta investigación se tomó un valor referencial del 20%.

$$A (\text{cub/cantón}) = \frac{\sum_{k=1}^n (V * MC)}{h} \quad (2)$$

En la ecuación [2], V representa el volumen de residuos sólidos que serán dispuestos anualmente en el cubeto y se calculó por medio de la ecuación [3]. MC equivale al porcentaje de material de cobertura, que se recomienda que por cada 4 a 5 m<sup>3</sup> de desecho sólido, se emplee 1 m<sup>3</sup> de material de cobertura (Rondón Toro, Szantó Narea, Pacheco, Contreras, & Gálvez, 2016). Sin embargo, en la práctica y de acuerdo a la experiencia del cantón Cuenca en el manejo de su relleno sanitario, se puede considerar hasta un 12% (Empresa Municipal de Aseo de Cuenca, 2016), valor adoptado para este estudio.

El producto de V \* MC se realizó para toda la vida útil del relleno sanitario, con k = 1 y n = 20. La letra h hace referencia a la altura del cubeto, que en este caso se consideró de 15 m (Collazos Peñaloza, 2013).

$$V = \left( \frac{P(\text{Anual})}{\rho} \right) * (1 - \text{asentamiento}) \quad (3)$$

En la ecuación [3], P(Anual) es la producción anual de residuos sólidos que se calculó con la ecuación [4]. A fecha del estudio, la provincia del Azuay generaba aproximadamente 400 Tn. diarias de basura, enmarcándose en un relleno sanitario de tipo mecanizado, con valores de compactación que generan un peso específico de los residuos ( $\rho$ ) entre 0.71 Tn/m<sup>3</sup> y 1 Tn/m<sup>3</sup> (Rondón et al., 2016). Con la utilización de equipos compactadores de basura especializados, maquinaria que es necesaria para la magnitud del relleno sanitario propuesto, el peso específico por ende, se puede establecer en 0.9 (Collazos Peñaloza, 2013), valor asumido para este estudio.

El valor por asentamiento representa el porcentaje de pérdida en el volumen de los residuos sólidos por los procesos químicos y biológicos de degradación, lo que puede llegar hasta el 40% (Ordoñez Ante & Villarraga Herrera, 2005). No obstante, aquí se tomó un valor de 15%, de forma conservadora.

$$P(\text{Anual}) = [P(\text{Servida}) * PPC] * 365 \quad (4)$$

En la ecuación [4], P(Servida) equivale al porcentaje de población que cuenta con el servicio de recolección de residuos sólidos y se calculó utilizando la fórmula [5]. PPC es igual a la producción per cápita de cada cantón, variable directamente relacionada con las condiciones socioeconómicas del país, razón por lo que dificulta proyectar su comportamiento a futuro. No obstante, Collazos (2013) y Zafra (2009) han estimado un crecimiento entre 0.5% y 1% anual. Es así que para esta investigación se utilizó un promedio de estos valores de 0.7% como crecimiento anual para todos los cantones, con el objetivo de no sub-dimensionar el área requerida.

$$P(\text{Servida}) = \frac{P * PCSR}{100} \quad (5)$$

En la ecuación [5], P es la población anual cantonal y PCSR representa el porcentaje de cobertura del servicio de recolección por cantón. El crecimiento anual del porcentaje de cober-

tura de recolección, depende de algunos factores como por ejemplo: la renovación de la flota vehicular, apertura de rutas de recolección, crecimiento poblacional, distancias entre centros poblados y otros factores económicos y sociales. En este estudio, se tomó como referencia el crecimiento en el nivel de cobertura del último año en Cuenca (1.27%), cantón con mayor desarrollo económico de la provincia. Por otro lado, en Latinoamérica llegar a un nivel de cobertura del 100% se ajusta al ámbito teórico más no práctico, por lo que se utilizó como umbral máximo de crecimiento, el 93.24% que presenta Cuenca para el año 2016 (Empresa Municipal de Aseo de Cuenca, 2016).

El número de habitantes para los años involucrados se tomaron del INEC, quienes tienen una proyección por cantón hasta el año 2030 (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos, 2010). Para los años faltantes, se usó fórmula de crecimiento exponencial especificada en la ecuación [6] aplicado por Bejarano (2005).

$$PF = PI * (e)^{r*(tf-ti)} \quad (6)$$

Donde PF es la población final para cada uno de los años siguientes al 2030; PI es la población inicial en el último año censal (2010); r representa la tasa de crecimiento entre los periodos proporcionados por el INEC (2010-2030); tf es el año al que se desea proyectar los datos y ti es el último año censal.

Para la determinación de la tasa de crecimiento (r), se utilizó como base el rango comprendido entre el año 2010 y 2030 y se calculó de acuerdo a la ecuación [7]

$$r = \ln \left( \frac{pf}{pi} \right) * \left( \frac{1}{tf - ti} \right) \quad (7)$$

En donde pf es la población del año del rango superior (2030); pi es la población del año del rango inferior (2010); tf es el año final y ti es el año inicial.

#### D. ANÁLISIS MULTICRITERIO BASADO EN GIS

Para la determinación geográfica de las áreas factibles para el emplazamiento del relleno sanitario, se utilizó un análisis de decisión multicriterio basado en GIS, conocido como GIS-MC-DA por sus siglas en inglés de GIS-bases multicriteria decision analysis. Técnica que permite estructurar, diseñar, evaluar y priorizar alternativas en problemas de decisión (Malczewski, 2006); mediante la evaluación de un conjunto de criterios cualitativos o cuantitativos previamente establecidos que inciden en el problema. Estos criterios pueden trabajar en sinergia con la asignación de valores ordinales o continuos comparables (Greene, Devillers, Luth, & Eddy, 2011). No obstante, una limitación importante radica en que la opción determinada como la mejor, no siempre es aquella que representa el mayor bienestar (Kylilia, Christoforou, Fokaidis, & Polycarpou, 2014).

En el ámbito espacial, se consideran dos tipos de criterios, que para la elección de sitios óptimos, trabajan conjuntamente. Estos criterios se definen como explícitos e implícitos. El primer tipo hace referencia cuando la condición está presente en el problema de decisión. En términos de búsqueda de lugares óptimos es el tamaño, la forma, la consolidación morfológica del área, entre otros. En cambio, un criterio implícito es aquel que necesita ser calculado en función a datos espaciales. Por ejemplo, costos de la disposición final de los residuos sólidos que se calcula en función a variables como: distancias y proximidad a otros elementos geográficos, pendientes, entre otros. (Malczewski, 2006).



A partir de GIS-MCDA, se han desarrollado una serie de métodos, que entre otros factores, dependen del contexto en el que se aplica, el tiempo y los datos disponibles, diferenciándose uno del otro principalmente en la forma de procesamiento de la información. Sin embargo, ninguno reemplaza ni se sobrepone a otro ya que en muchos de los casos trabajan en conjunto (Kyllilia et al., 2014). Es por ello, que para la elección del modelo a utilizarse, se debe contemplar factores como: número de tomadores de decisión, fases de decisión, tolerancia al riesgo, incertidumbre, capacidad de recursos computacionales, experiencia, unidades y escala de medición. Además, como parte fundamental para la elección del camino a seguir, se debe identificar el número de objetivos que se pretende abordar en el estudio (Greene et al., 2011).

Cuando se analiza varios objetivos, cada uno de ellos con sus propios criterios, se sigue el modelo multi-objetivo o MODM por sus siglas en inglés de multiple-objective decision making. Cuando se analiza un solo objetivo, en el que intervienen diversos atributos, como el abordado en este trabajo, se cuenta con el modelo multi-atributo o MADC por sus siglas en inglés de multiple-attribute decision making. Éste último, permite aplicar métodos compensatorios entre atributos, ya que lo que se pierde en un criterio, gana en otro, con el objetivo de ajustarse más a la realidad (Malczewski, 2004).

Además, en el marco de GIS-MCDA existen métodos que hacen referencia al análisis de los criterios y la ponderación que reciben cada uno de ellos. Así se tiene el caso del proceso analítico jerárquico (AHP) utilizado por Zafra Mejía, Mendoza Castañeda, & Montoya Varela (2012); Tavares, Zsigraiová, & Semiao (2011); Siddiqui, Everett, & Vieux (1996), Yalcin (2008). Otros métodos son: el de toma de decisiones borroso abordado por Chang, Parvathinathan, & Breed (2008); promedio ponderado ordenado (OWA) discutido en Malczewski & Liua (2014) y combinación lineal ponderada (WLC) utilizado por Al-Hanbali, Alsaaidh, & Kondoh (2011).

Este último modelo fue el más idónea para la problemática que aborda este estudio, debido a su fácil implementación y a lo intuitivo que resulta para los tomadores de decisión; a pesar de que se ha sugerido que subestima la complejidad del problema porque se centra en los factores y no en la combinación de los mismos (Malczewski, 2004). Su metodología consiste en normalizar la escala valorativa, para que todos los criterios puedan evaluarse de la misma forma y posteriormente aplicar un peso de importancia relativa para cada criterio, lo que permite la compensación de variables.

A pesar de que sus resultados pueden tornarse subjetivos, debido a que depende de los conocimientos previos del experto; WLC, por su gran flexibilidad, proporciona buenos resultados en la selección de sitios óptimos a escalas regionales (como la aplicada en este estudio) (Al-Hanbali et al., 2011; Yalcin, 2008).

El procesamiento de los datos disponibles se realizó en el paquete informático ArcGis en donde se llevó a cabo las siguientes fases:

**Definición de criterios:** De acuerdo al alcance de este estudio, se consideró criterios de idoneidad básicos a escala regional que se fundamentaron en la normativa nacional vigente, estudios previos y a la disponibilidad de información. Estos criterios encajan en tres de los cuatro factores estipulados por el Ministerio del Ambiente (2015), como son: ambientales, técnicos y sociales. En el primer grupo encajan distancia a cuerpos hídricos, precipitaciones y distancia a zonas edificadas. En el segundo grupo se tiene permeabilidad del suelo, estabilidad del

terreno, distancia a material de cobertura, pendientes y distancia a vías. En el tercer grupo se contempla el uso del suelo.

**Distancia a cuerpos hídricos:** es importante que el relleno sanitario se encuentre lo más lejos posible de un cuerpo de agua para evitar contaminación con los lixiviados. Este tipo de sustancias contaminantes contienen una importante carga de cloruros, nitratos y nutrientes como el nitrógeno y fósforo que provocan disminución en los niveles de concentración del oxígeno y la eutrofización del agua (Colomer et al., 2013). Esto repercute en la salud y calidad de vida de los habitantes (Mego, Pilco, Chávez, Leiva, & Cruz, 2016).

**Precipitaciones:** las condiciones climatológicas de los sitios en donde se ubican los rellenos sanitarios pueden influenciar en la hidrología e hidrogeología por la generación de lixiviados y su filtración a aguas subterráneas (de León-Gómez, Cruz-Vega, Dávila-Pórceles, Velasco-Tapia, & Chapa-Guerrero, 2015). En el caso de que los niveles de precipitaciones sean altos, aumenta el riesgo de que se contaminen los recursos hídricos por fugas, necesiéndose de infraestructura de drenaje, cunetas de coronación y sistemas de control y vigilancia de la red de eliminación de aguas residuales. Todo esto repercute en aumento de los costos de implementación de rellenos sanitarios (Demesouka, Vavatsikos, & Anagnostopoulos, 2013).

**Permeabilidad del suelo:** Es uno de los factores más importantes dentro de la determinación de un sitio para un relleno sanitario, puesto que de esto depende el transporte de contaminantes a las aguas subterráneas, encontrándose en estrecha relación con el tipo de suelo (El Baba & Kayastha, 2014). En la actualidad, se utilizan capas impermeables de polímeros que ayudan a evitar la infiltración de lixiviados.

**Estabilidad:** Los suelos que gozan de mayor estabilidad, poseen una buena retención y circulación del agua, así como una baja separabilidad de partículas de los agregados, lo que concluye en una menor degradación física (Fernández, González, & Sáez Sáez, 2016). Este factor es importante debido a que, en etapas de construcción, operación y mantenimiento de un relleno sanitario, se desarrollan actividades de excavación y de movimiento de tierras que de una u otra forma alteran las unidades geotécnicas. (Zapata Muñoz & Zapata Sanchez, 2013)

**Distancias a zonas edificadas (asentamientos humanos):** Este criterio se lo considera en el marco de que, a mayor distancia de recorrido de los camiones recolectores, mayor es el costo de operación (Bernache Pérez, 2015). Además, se asocia otras problemáticas como el ruido, malos olores, material esparcido en la vía, entre otros impactos propios del traslado de desechos (Coronado Cárdenas, Sotelo Rojas, & Chávez Porras, 2011).

**Distancia a material de cobertura:** El material de cobertura actúa como barrera para impedir el contacto de los residuos sólidos con el ambiente y así controlar los impactos que se puedan generar. Es por ello, que se debe disponer de este tipo de material lo más cerca posible. De no ser así, implica costos de extracción y movilización (Collazos Peñalosa, 2013), (Sandoval Alvarado, 2008).

**Pendientes:** Las pendientes pronunciadas representan costos por actividades de excavación y de estabilización de la zona durante la etapa constructiva de un relleno sanitario (Fernandez Nascimento & Marco da Silva, 2014). A ello se suma el riesgo de contaminación de aguas superficiales por el derrame de residuos sólidos y flujo de lixiviados a zonas con menor pendiente (cuerpos de agua, poblados) (Demesouka, Vavatsikos, & Anagnostopoulos, 2014).

Distancia a vías: De acuerdo con análisis espaciales, los mejores sitios para emplazar un relleno sanitario están asociados a una buena accesibilidad vial (Ali Ashraf, Rezuanul Islam, & Gani Adnan, 2015). Este criterio en conjunto con el uso de suelo y la distancia a zonas edificadas, son atribuibles a ocasionar el menor impacto posible, pero al mismo tiempo, deben favorecer la ampliación del servicio con los años (Buenrostro et al., 2005). Además, es importante considerar que la construcción de nuevas vías genera impactos ambientales como activación de procesos erosivos y cambios en el paisaje (Zapata Muñoz & Zapata Sanchez, 2013)

Uso de suelo: Esta variable tiene por objetivo contribuir a la reducción de los impactos ambientales y los conflictos con la comunidad, de forma que se enmarque dentro de los procesos de planificación territorial al identificar áreas cuyo uso no está asociado a actividades productivas y permitan el emplazamiento de un relleno sanitario. (Cárdenas-Moreno, Robles-Martínez, Colomer Mendoza, & Piña-Guzmán, 2016) (De Feo & De Gisi, 2014).

Así también, se estipuló criterios de restricción para zonas no aptas para la construcción de un relleno sanitario. En este estudio se consideró todas aquellas áreas que pertenecen al sistema nacional de áreas protegidas (SNAP), zonas con fallas geológicas y un radio de 500 metros de centros educativos.

Asignación de puntajes normalizados (x): Para evaluar conjuntamente los diferentes criterios, es necesario que estos tengan la misma escala de valoración. En este estudio se utilizó 3 valores en una escala del 1 al 10 abordados por Erazo (2016), donde 1 representa la puntuación más baja en términos de idoneidad del sitio, 5 una puntuación intermedia y 10 es la más alta, tal como se indica en la Tabla II.

Ponderación relativa de los criterios (w): Otra fase importante dentro de WLC, consiste en determinar la importancia relativa de cada criterio en la problemática planteada y compensar el modelo mediante la asignación de pesos.

En este estudio, el orden de importancia asignado a cada criterio corresponde a los implementados para la localización del nuevo relleno sanitario para el cantón Cuenca realizado por EMAC et al., (2001). Estas ponderaciones fueron adaptadas a porcentajes sobre el 100%, ya que no se consideraron pesos a los factores como el caso del estudio mencionado. Es así que a distancias de cuerpos hídricos se le asignó 26%, precipitaciones 18%, permeabilidad del suelo 15%, estabilidad del terreno 15%, distancia a zonas urbanas 9%, distancia a material de cobertura 7%, pendientes 5%, distancia a vías de comunicación 3%, uso de suelo 2%.

**TABLA II**  
VARIABLES Y PONDERACIONES PARA EL ANÁLISIS MULTICRITERIO

CRITERIOS	CLASIFICACIÓN	PONDERACIÓN
Distancia a las vías (tipo1-tipo2-calles)	0-5km	10
	5-10km	5
	10-15km	1
	> a 15km	1
Distancia a cuerpos hídricos perennes	0-49m	1
	50-499m	5
	500-999m	5
	1000-1999m	10
	> a 2000m	10

Distancia a zonas edificadas	2000-4999 m	10
	5000-9999 m	10
	10000-24999 m	5
	25000-49999 m	1
	> a 50000 m	1
Uso de suelo	Tierra sin vegetación	10
	Cultivos	5
	Matorrales	5
	Pastizales	5
	Bosques	1
	Pantanos	1
	Zonas edificadas	1
Zona sin información	1	
Permeabilidad	Alta	1
	Media	5
	Baja	10
Distancia de obtención del material de cobertura	0-1999m	10
	2100-3999m	10
	4000-5999m	5
	6000-10000m	5
	> a 10000m	1
Estabilidad del terreno	Estable	10
	Moderadamente	10
	Umbral	5
	Inestable	1
Precipitaciones	0-999 mm	10
	1000-2499 mm	5
	2500-4000 mm	1
Pendiente	0-3%	10
	3.1-7%	10
	7-12%	5
	12-25%	1
	> a 25%	1

Agregación de criterios (A): La combinación de los diversos factores de acuerdo a WLC, se realiza mediante la multiplicación de los valores de la escala normalizada con la ponderación relativa asignada a cada criterio y suma estos productos de todos los criterios para obtener la idoneidad final en cada celda (Ozturk & Batuk, 2011). Adicionalmente, a la capa resultante, se resta la máscara construida con las zonas restringidas (re) como se estipula en la ecuación [8].

$$A_i = \left( \sum_{k=1}^n x_i w_i \right) - re \quad (8)$$

Donde i representa la posición de los pixeles dentro de un vector y n es el número de criterios evaluados en el modelo.

Jerarquización de sitios: La capa raster resultante presentó una escala valorativa que va del 1 a 9. El valor más bajo representa el sitio menos apropiado para el emplazamiento del relleno sanitario en función de los criterios evaluados y el valor más alto indica las zonas más idóneas.

La elección de los sitios potenciales se realizó con las áreas ponderadas del 7 al 9, lo que indica un cumplimiento satisfactorio de los parámetros considerados, según discrecionalidad de los autores. Pero para ello, previamente se realizó una depuración de las zonas resultantes con el objetivo de eliminar pequeñas áreas aisladas y proveer zonas compactas, utilizando filtros y

refinamiento de bordes. Finalmente, se eliminaron áreas inferiores a la requerida para el relleno sanitario mancomunado.

### III. RESULTADOS

#### A. TAMAÑO DE LA CELDA

El área proyectada para el relleno sanitario mancomunado de la Provincia del Azuay está en el orden de las 41.74 Ha. de terreno. De las cuales, 34.78 Ha. serían para el cubeto y 6.96 Ha. para obras complementarias, tal como se muestra en la Tabla III.

De acuerdo a un promedio de producción diaria de residuos sólidos, realizado entre el 2025 y 2045, se estarían receiptando 634.18 Tn. De las cuales, el 12.77% representa a la D.H del Jubones y 87.23% a la D.H del Santiago, considerándose que en esta última D.H se encuentra el cantón Cuenca, mayor productor de desechos de la provincia, que aporta con un 77.70% (Tabla IV)

#### B. IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS POTENCIALES

En la provincia del Azuay, aplicando el GIS-MCDA con el método WLC en donde se procesaron las variables de la Figura 2 y las restricciones de la Figura 3, se obtuvo como resultado 354000 Ha. valoradas en una escala que va del 2 al 9. De este total, el valor 6 es el más representativo ya que representa el 40.2% del territorio, a lo que le sigue el valor 7 con 25.8%. No obstante, las ponderaciones más altas de 8 y 9 representan tan solo un 2.7% y 0.1% respectivamente (Ver Figura 4). Cabe recalcar que el 51.70% del territorio azuayo fue considerado como restringido para este tipo de infraestructura, sumando áreas protegidas por el SNAP, fallas geológicas y un radio de influencia de 500 m. a centros educativos.

**TABLA III**  
TAMAÑO DEL CUBETO DEL RELLENO SANITARIO POR AÑO

AÑO	T.R.S (TN./AÑO.)	V.R.S. + MC (MILES DE M <sup>3</sup> )	A.R.S.A. (HA.)
2025	480.14	189.01	1.26
2026	492.82	194.00	2.55
2027	505.68	199.06	3.88
2028	518.73	204.19	5.24
2029	531.96	209.41	6.64
2030	545.33	214.67	8.07
2031	561.09	220.85	9.54
2032	576.82	227.04	11.05
2033	592.50	233.28	12.61
2034	608.63	239.61	14.21
2035	626.61	246.61	15.85
2036	643.47	253.25	17.54
2037	660.82	260.07	19.27
2038	678.66	267.39	21.06
2039	697.01	270.97	22.86
2040	715.88	278.34	24.72
2041	735.31	285.92	26.62
2042	755.29	293.72	28.58
2043	775.75	301.71	30.59
2044	796.80	309.93	32.66
2045	818.48	318.40	34.78
Área total del cubeto (Ha.)			34.78
Obras adicionales (20%)			6.96
Área total del relleno sanitario (Ha.)			41.74

Nota: R.D.R.S = Cantidad de residuos sólidos recolectados por año; V.R.S = Volumen de residuos sólidos; MC = Material de cobertura; A.R.S.A = Área del cubeto del relleno sanitario.

Se determinó que el 11% de la superficie del Azuay, presenta características idóneas para emplazar un relleno sanitario mancomunado. Para ello, se consideró, según se estipula en la metodología, los puntajes mayores o iguales a 7 en la escala valorativa y áreas superiores a las 40 Ha (Área mínimo del relleno sanitario). De esta superficie, apenas el 0.4% tiene una valoración de 9, lo que representa 322.40 Ha; el 10.6% tiene una valoración de 8 con 9306.62 Ha y el 89% presenta una valoración de 7, que equivale a 78317.14 Ha. Superficie distribuida en los cantones de Cuenca, Santa Isabel, Nabón, Gualaceo, Oña, Girón, Paute, Sigsig, San Fernando, Guachapala, Chordeleg, El Pan y Sevilla de Oro, enumeradas en orden descendente de acuerdo a la cantidad de superficie idónea que presenta el cantón. Lo que deja a los cantones de Camilo Ponce Enriquez y Pucará, sin área idónea.

De la lista anterior, los cinco primeros cantones representan el 75% del total de área idónea, distribuida en 28%, 19%, 13%, 8% y 7% respectivamente (Ver Figura 5).

En términos de idoneidad y utilizando una delimitación política administrativa más pequeña como la parroquial, se identificó mosaicos de áreas que sobresalen por su puntuación de 8 y 9. Es así que se tiene: Santa Isabel y Abdón Calderón para el cantón Santa Isabel; Gualaceo, Daniel Córdova Toral y Luis Cordero Vega para el cantón Gualaceo; Tarqui, Quingeo y Cumbe para el cantón Cuenca. Para el caso de Nabón y Oña, no se encontraron áreas con ponderaciones de 9.

**TABLA IV**  
PROMEDIO DE PRODUCCIÓN DIARIA DE RESIDUOS SÓLIDOS POR CANTÓN

	CANTÓN	G.D. PROMEDIO (TN/DÍA)	PORCENTAJE (%)
D.H. DEL JUBONES	Oña	0.80	0.13
	Camilo Ponce	44.49	7.02
	Nabón	8.04	1.27
	Girón	6.04	0.95
	Pucara	5.38	0.85
	San Fernando	2.58	0.41
	Santa Isabel	13.59	2.14
	Total	80.93	12.77
D.H. DEL SANTIAGO	El Pan	0.99	0.16
	Chordeleg	4.86	0.77
	Gualaceo	21.75	3.42
	Cuenca	492.73	77.70
	Sevilla de Oro	4.46	0.70
	Guachapala	1.28	0.20
	Paute	9.97	1.57
	Sigsig	17.21	2.71
	Total	553.25	87.23
Total Provincial	634.18	100	

Nota: G.D = Generación de residuos sólidos diarios

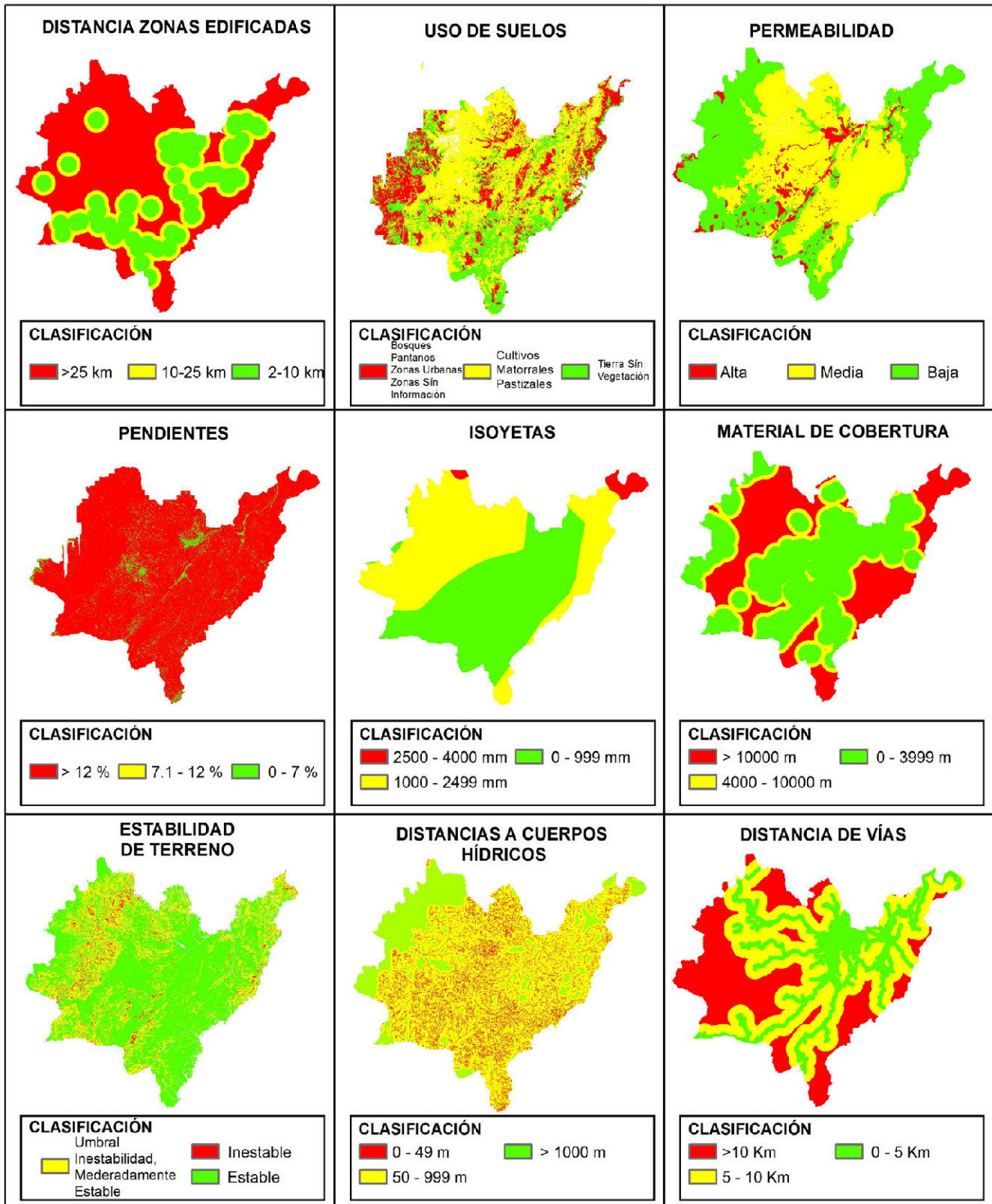


Figura. 2. Criterios de factibilidad

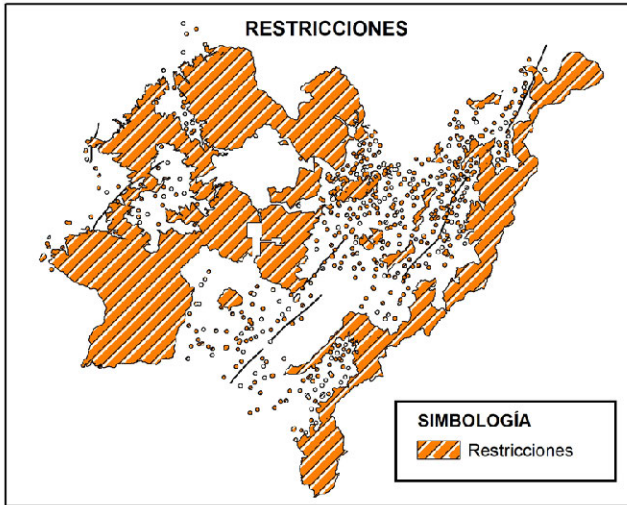


Figura 3. Restricciones

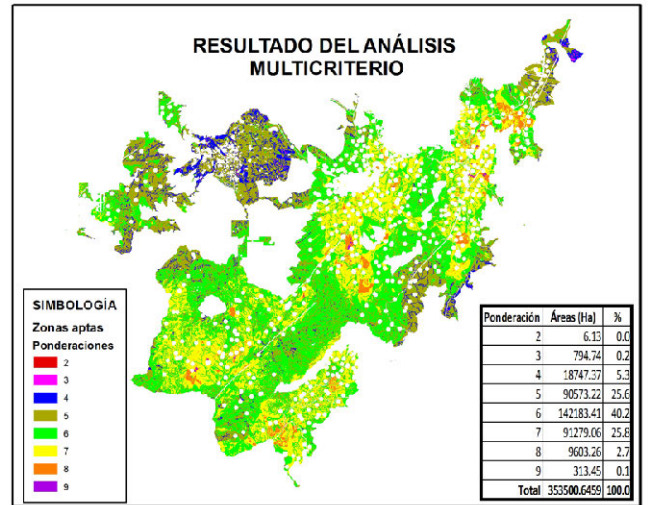


Figura 4. Resultado del análisis multicriterio

**POTENCIALES ÁREAS DE EMPLAZAMIENTO DE UN RELLENO SANITARIO MANCOMUNADO EN LA PROVINCIA DEL AZUAY**

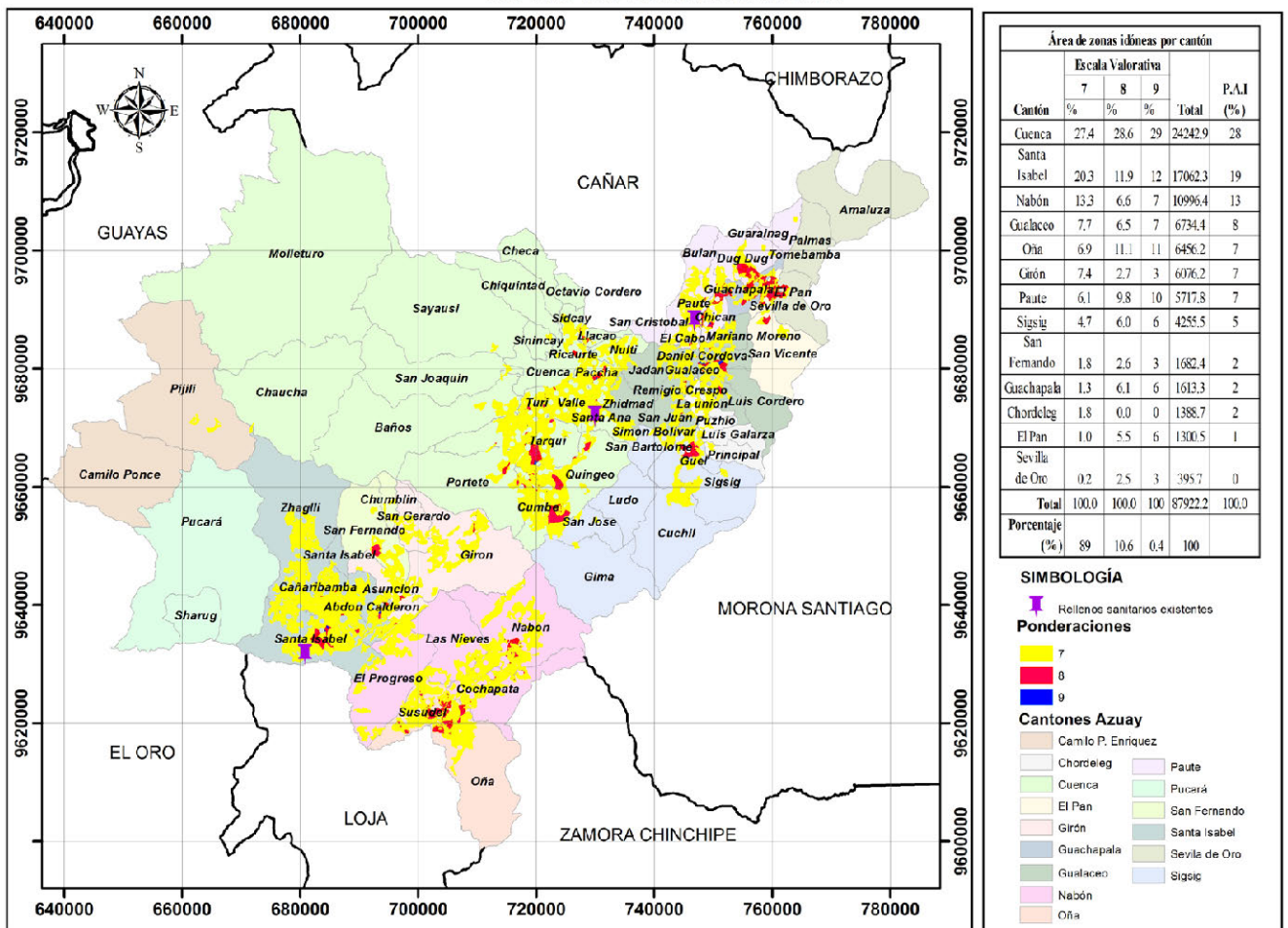


Figura 5. Mapa de potenciales áreas para la implementación de un relleno sanitario mancomunado en la provincia del Azuay

#### IV. CONCLUSIONES

El resultado del análisis multicriterio proporcionó una gran cantidad de terreno con una puntuación de 6. Sin embargo, debido a que se encuentran por debajo del 70% en el cumplimiento de los criterios analizados, estas zonas fueron excluidas de las áreas identificadas como idóneas. Abordándose para el presente estudio, solo aquellas con valoraciones de 7, 8 y 9. De estas últimas, las áreas con puntuación de 7 tuvieron la mayor superficie, mientras que las categorizadas con 9, se presentaron en menor cantidad.

Al sobreponer las áreas obtenidas como idóneas con la ubicación de los rellenos sanitarios actualmente existentes en la provincia, se determinó que Pichacay (Cuenca) y el sitio de disposición final del cantón Paute, ubicado en el sector de San Ignacio, se asientan en sectores con mosaicos de valoraciones entre 7 y 8. Mientras que Huascachaca (Santa Isabel), está emplazado en un sector con una puntuación de 7.

En contraste con la metodología aplicada en la determinación de los sitios de disposición final ya existentes, que utilizaron matrices analógicas multicriterio, propias de la evaluación de impactos ambientales, caracterizadas en la experiencia de los técnicos más no en la incorporación de herramientas informáticas de apoyo a la toma de decisiones; el presente estudio, utilizó información digital en un análisis de decisión multicriterio basado en GIS que permitió un tratamiento simultáneo de datos espaciales como no espaciales de diferentes fuentes y escalas, cuyos resultados fueron evaluados de forma ágil y sencilla.

Con el fin de cumplir los objetivos de esta investigación, se partió de información secundaria generada por instituciones competentes en el campo o por aquellas que han realizado estudios sobre la temática. Las variables utilizadas corresponden a una escala regional con el fin de tener una primera aproximación de las zonas idóneas para establecer un relleno sanitario. Sin embargo, sobre estos sitios se debería proyectar estudios específicos con la inclusión de variables a escala local en el marco de factores sociales, técnicos, ambientales y económicos, que permitan aumentar el nivel de precisión en la delimitación de superficies de terreno y desestimar zonas como Tarqui, Portete y Cumbe por ser consideradas áreas productivas; Llaocao, Nulti y Paccha por riesgos de deslizamiento. Esto de acuerdo al plan de desarrollo y ordenamiento territorial del cantón Cuenca. De igual forma, se tiene la parroquia El Valle donde estuvo operando el antiguo relleno sanitario del cantón Cuenca, lo que provocó conflictos sociales que no favorecería nuevamente la construcción de este tipo de infraestructura.

Por otro lado, variables a escala local, podrían destacar áreas donde ya se encuentran funcionando rellenos sanitarios por más de 8 años y que se han consolidado como experiencias exitosas. Estos son los casos de Huscachaca y Pichacay que, de acuerdo a la planificación territorial de Santa Isabel y Cuenca respectivamente, están consideradas como zonas in-

dustriales compatibles con este tipo de actividades. Además, ya tienen una connotación regional o de mancomunidad, debido a que reciben residuos sólidos de varios cantones. Por lo tanto, su viabilidad social ya ha sido manejada, disminuyendo conflictos en este orden. Sin embargo, las condiciones climáticas de estos dos lugares difieren drásticamente en cuanto a precipitación se refiere. Es así, que en Huscachaca se registra precipitaciones anuales promedio de entre 100 y 200 mm; mientras que Pichacay está en el rango de 1000 a 1500 mm. Criterio que mientras más bajo sea, facilita entre otros aspectos, la compactación de los residuos sólidos y de su material de cobertura, así como genera menor volumen en lixiviados.

De acuerdo a la generación diaria de residuos sólidos, el punto de gravedad está ubicado en el cantón Cuenca. Sin embargo, un análisis por demarcaciones hidrográficas, excluyendo a este gran productor, sesgaría mínimamente el centro de gravedad hacia la D.H del Jubones, al sur de la provincia. Es así, que teniendo en cuenta una cercanía al centro de gravedad, los sitios factibles para un relleno sanitario estarían en los cantones de Santa Isabel, Nabón y Oña.

Las variables empleadas para el análisis multicriterio, obedecieron a factores ambientales, técnicos y sociales, en los cuales primó la protección de la red hídrica, precipitaciones, geología e impermeabilidad del suelo. Esto, con el objetivo de disminuir la cantidad de lixiviados y su impacto sobre el ecosistema, aspecto ambiental crítico en la fase de operación y mantenimiento de un relleno sanitario. Además, estos criterios pueden servir como punto de partida para la implementación de otro tipo de infraestructura de similares características e impactos ambientales. Tal es el caso de estaciones de transferencia, escombreras y plantas de tratamiento de residuos sólidos orgánicos e inorgánicos.

Como conclusión, los SIG son herramientas tecnológicas que se han convertido en piezas fundamentales e ineludibles en estudios territoriales. Es así que su manejo se ha extendido a una diversidad de disciplinas y perfiles, por lo que se ha agregado diferentes modelos complementarios que soporten la planificación, el análisis y las decisiones.

Entre estos modelos, se encuentra el GIS-MCDA, enfocado en facilitar la decisión en temas complejos. De forma particular, ha permitido identificar potenciales zonas para establecer un relleno sanitario de 41.74 Ha para 20 años de vida útil y que servirá para la disposición final de los desechos sólidos de los 15 cantones, mediante la conformación de una mancomunidad.

La precisión en los resultados obtenidos, depende de la calidad de los insumos o información de partida. Para ello, se debe considerar factores como: actualización de datos para ajustarse a la realidad; escalas de trabajo en función a la superficie de estudio y al nivel de detalle deseado; equipos y metodología de obtención y procesamiento de datos que garanticen su veracidad.

#### REFERENCIAS

- Al-Hanbali, A., Alsaadeh, B., & Kondoh, A. (2011). Using GIS-Based Weighted Linear Combination Analysis and Remote Sensing Techniques to Select Optimum Solid Waste Disposal Sites within Mafraq City, Jordan. *Journal of Geographic Information System*, 267-278. doi:10.4236/jgis.2011.34023
- Ali Ashraf, M., Rezuanul Islam, M., & Gani Adnan, S. (2015). Gis and multi criteria decision method based approach of identifying appropriate landfill sites for the city of Chittagong. *International Journal of Environment*. doi:2091-2854
- Alianza por la Solidaridad. (2014 a). Como elaborar el diagnóstico financiero y la ordenanza de creación de una EMMAI. Guía, Alianza por la Solidaridad, Cuenca.
- Alianza por la Solidaridad. (2014 b). Como elaborar la planificación estratégica de una EMMAI. Alianza por la Solidaridad, Cuenca.

- Asamblea Nacional de la República del Ecuador. (2008). Constitución de la República del Ecuador. Quito: Registro oficial Nro. 449.
- Bejarano, C. (Junio de 2005). Modelos de simulación para el estudio de crecimiento poblacional exponencial. *Épsilon*(4), 69-81.
- Bernache Pérez, G. (junio de 2015). La gestión de los residuos sólidos: un reto para los gobiernos locales. *Sociedad y Ambiente*, 1(7), 72-101. doi:2007-6576
- Buenrostro, O., Mendoza, M., & López, E. (2005). Análisis comparativo de tres modelos de soporte de decisiones espaciales en la selección de sitios para rellenos sanitarios en la cuenca del lago de Cuitzeo, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*(57), 21-38. doi:0188-4611
- Cárdenas-Moreno, P. R., Robles-Martínez, F., Colomer Mendoza, F. J., & Piña-Guzmán, A. B. (2016). Herramientas para la evaluación de riesgos sobre el ambiente y la salud, por la disposición final de residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 32, 47-62. doi:10.20937/RICA.2016.32.05.04
- Carmona Merat, D. (2015). Desarrollo de una manual de construcción de un relleno sanitario piloto de residuos sólidos urbanos con sistema natural de alta velocidad. Escuela Superior Politécnica de Sevilla, I.T.I. Química.
- Chang, N.-B., Parvathinathanb, G., & Breed, J. (2008). Combining GIS with fuzzy multicriteria decision-making for landfill siting in a fast-growing urban region. *Journal of Environmental Management*, 139-153. Obtenido de [www.elsevier.com/locate/jenvman](http://www.elsevier.com/locate/jenvman)
- Collazos Peñaloza, H. (2013). Diseño y operación de rellenos sanitarios (Cuarta ed.). Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería. doi:9789588726120
- Colomer Mendoza, F., Altabella, J. E., Ferrán García, D., Herrera Prats, L., & Robles Martínez, F. (Agosto de 2013). Influencia de la ubicación de los rellenos sanitarios en el impacto ambiental. Caso de España. *Revista Académica de la FI-UADY*, 141-151. doi:1665-529-X
- Consortio Público de la Cuenca del Río Jubones. (2013). El proceso mancomunado de los gobiernos autónomos descentralizados de la cuenca del Río Jubones 2000-2013. Quito: Creatibros.
- Coronado Cárdenas, O. L., Sotelo Rojas, H., & Chávez Porras, Á. (2011). Diseño y proyección logística de un centro de acopio y manejo de residuos sólidos para el relleno sanitario Doñar Juana. *Revista Gestion Integral en Ingeniería Neogranadina*, 3(1).
- De Feo, G., & De Gisi, S. (2014). Using MCDA and GIS for hazardous waste landfill siting considering land scarcity for waste disposal. *Revista Elsevier*. doi:10.1016/j.wasman.2014.05.028
- de León-Gómez, H., Cruz-Vega, C., Dávila-Pórcel, R. A., Velasco-Tapia, F., & Chapa-Guerrero, J. (2015). Impacto del lixiviado generado en el relleno sanitario municipal de Linares (Nuevo León) sobre la calidad del agua superficial y subterránea. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 32(3), 514-526.
- Demesouka, O., Vavatsikos, A., & Anagnostopoulos, K. (2013). Suitability analysis for siting MSW landfills and its multicriteria spatial decision support system: Method, implementation and case study. *Elsevier*, 33, 1190-1206.
- Demesouka, O., Vavatsikos, A., & Anagnostopoulos, K. (2014). GIS-based multicriterial municipal solid waste landfill suitability analysis: A review of the methodologies performed and criteria implemented. *Waste Management & Research*, 1-27. doi:10.1177/0734242X14526632
- Díaz, A. (2015). Simulación de los cubetos 8 y 9 del relleno sanitario Q del DMQ, usando el modelo computacional Corenostós V3. Tesis, Universidad Internacional SEK, Facultad de Ciencias Naturales y Ambientales, Quito.
- El Baba, M., & Kayastha, P. (18 de Diciembre de 2014). Landfill site selection using multi-criteria evaluation in the GIS interface: a case study from the Gaza Strip, Palestine. doi:10.1007/s 12517-014-1736-9
- Empresa Municipal de Aseo de Cuenca. (2016). Proyección de la demanda de volúmenes de desechos sólidos y material de cobertura para el relleno sanitario de Pichacay. Cuenca.
- Empresa Municipal de Aseo de Cuenca; Municipio de Cuenca; Empresa de telefonía, agua potable y alcantarillado de Cuenca. (2001). Informe sobre la localización del nuevo relleno sanitario para el cantón Cuenca. Cuenca.
- Empresa pública municipal mancomunada de aseo integral de la cuenca del Jubones. (s.f). EMMAICJ-EP. Recuperado el 25 de mayo de 2017, de <http://www.emmaicj.gob.ec/Home.aspx?idsbm=26>
- Erazo Tapia, N. R. (2016). Identificación de sitios potenciales para la construcción de un relleno sanitario a partir de un SIG en el municipio de Pupiales -Nariño. Universidad de Manizales, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Manizales.
- Espinosa Silva, A., & González García, A. (2011). La acumulación de basura como material geotécnico II: Comportamiento de las basuras. *Revista de Ingeniería*. doi:<http://dx.doi.org/10.16924/riua.v0i14.539>
- Fernandez Nascimento, V., & Marco da Silva, A. (2014). Identifying problems for choosing suitable areas for installation of a new landfill through GIS technology: A case study. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 64(1), 80-88. doi:10.1080/10962247.2013.833558
- Fernández, L., González, M., & Sáez Sáez, V. (diciembre de 2016). Relación entre un índice de estabilidad estructural de suelo, la zona bioclimática y la posición fisiográfica en Venezuela. *Terra Nueva Etapa*, 32(52), 139-149. doi:1012-7089
- Fundación IPADE. (2011). Como construir empresas municipales mancomunadas de aseo integral (EMMAI). Cuenca.
- Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal del Cantón Cuenca. (23 de Junio de 2016). Cuenca Alcaldía. Recuperado el 25 de Mayo de 2017, de <http://www.cuenca.gov.ec/?q=content/alcalde-suscribi%C3%B3-convenio-para-que-relleno-sanitario-funcione-hasta-el-2031-en-pichacay>
- Greene, R., Devillers, R., Luth, J., & Eddy, B. (2011). GIS-Based Multiple-Criteria Decision Analysis. *Geography Compass*, 5/6(10), 412-432. Obtenido de 1749-8198.2011.00431.x
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010). Fascículo Provincial Azuay. Quito: INEC. Recuperado el 16 de Abril de 2017

- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2010). INEC. Recuperado el 26 de Abril de 2017, de <http://www.ecuadorcencifras.gob.ec/proyecciones-poblacionales/>
- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. (2015). INEC. Recuperado el 16 de Abril de 2017, de <http://www.ecuadorcencifras.gob.ec/municipios-y-consejos-provinciales/>
- Kyllia, A., Christoforou, E., Fokaidis, P., & Polycarpou, P. (Febrero de 2014). Multicriteria analysis for the selection of the most appropriate energy crops: the case of Cyprus. *International Journal of Sustainable Energy*. doi:10.1080/14786451.2014.898640
- Malczewski, J. (2004). GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview. *Progress in Planning*. doi:10.1016/S0305-9006(03)00079-5
- Malczewski, J. (Agosto de 2006). GIS based multicriteria decision analysis: a survey of the literature. *International Journal of Geographical Information Science*, 20(7). doi:10.1080/13658810600661508
- Malczewski, J., & Liua, X. (2014). Local ordered weighted averaging in GIS-based multicriteria analysis. *Annals of GIS*, 20(2), 117-129. doi:10.1080/19475683.2014.904439
- Mego, J., Pilco, J., Chávez, J., Leiva, D., & Cruz, M. O. (11 de 01 de 2016). Impacto en la calidad del agua de la quebrada "El Atajo" ocasionado por el botadero de rondón de la ciudad de Chachapoyas, Amazonas, Perú. *Indes*, 2(1), 80-87. doi:2310-0664
- Ministerio de Coordinación de la Política y Gobiernos Autónomos Descentralizados. (Febrero de 2011). Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización. Quito, Pichincha, Ecuador: V&M Gráficas. Obtenido de [http://www.ame.gob.ec/ame/pdf/cootad\\_2012.pdf](http://www.ame.gob.ec/ame/pdf/cootad_2012.pdf)
- Ministerio del Ambiente & Ministerio de Salud Pública. (2014). Reglamento interministerial para la gestión integral de desechos sanitarios. En P. C. Ecuador, Registro Oficial Nro 379 (Vol. 2, págs. 13 - 30). Quito.
- Ministerio del Ambiente. (2015). Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria. Quito: Registro Oficial.
- Mirabal Silva, L. M., & Mirabal, J. J. (Noviembre de 2016). Problemática de los desechos sólidos en el municipio San Fernando estado Apure. *Novum Scientiarum*, 1(3), 48-59.
- Ordoñez Ante, C. A., & Villarraga Herrera, M. R. (Diciembre de 2005). Asentamientos en el relleno sanitario Curva de Rodas de la ciudad de Medellín, Colombia. *Politécnica*, 2, 57-72.
- Organización Mundial de la Salud - OMS. (Mayo de 2002). ANÁLISIS SECTORIAL DE RESIDUOS SÓLIDOS - ECUADOR. Obtenido de <http://www.cepis.ops-oms.org/residuos>
- Ozturk, D., & Batuk, F. (2011). Implementation of GIS-Based Multicriteria decision analysis with VB in ArcGis. *International Journal of Information Technology & Decision Making*, 6(10), 1023-1042. doi:10.1142/S0219622011004695
- Quintero Torres, D. I. (Diciembre de 2016). El papel de la gestión territorial en la ubicación de rellenos sanitarios. Caso. *Perspectiva Geográfica*, 21(2), 251-276. doi:10.19053/01233769.5852
- Ramos Sánchez, J. M. (Octubre de 2016). Evaluación del uso de biogas en rellenos sanitarios: el caso de Mallasa. *DE-LOS - Desarrollo Local Sostenible*, 9(27). doi:1988-5245
- Rikalovic, A., Cosic, I., & Lazare, D. (2014). GIS Based multi-criteria analysis for industrial site selection. *Procedia engineering*, 69, 1054-1063. doi:10.1016/j.proeng.2014.03.090
- Rondón Toro, E., Szantó Narea, M., Pacheco, J. F., Contreras, E., & Gálvez, A. (2016). Guía general para la gestión de residuos sólidos domiciliarios. Santiago, Chile: Publicación de las Naciones Unidas. doi:2518-3923
- Sáez, A., & Urdaneta, J. (Diciembre de 2014). Manejo de residuos sólidos en América Latina y el Caribe. (e. C. Red de Revistas Científicas de América Latina, Ed.) *Omnia*(3), 121-135. Obtenido de <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=73737091009>
- Sanchez Bernal, E., Rodríguez León, A., Sandoval Orozco, G., Camacho Escobar, M., & Estrada Vázquez, C. (2015). Generación de residuos sólidos municipales en San Pedro Mixtepec, Juquila, Oaxaca. Impactos ambientales y alternativas. *The Revista Internacional de Ciencia y Sociedad*, 2(1). doi:2340-9991
- Sandoval Alvarado, L. (2008). Guía de: Diseño, construcción, operación, mantenimiento y cierre de relleno sanitario mecanizado. San Isidro, Lima, Perú: Red de instituciones especializadas en capacitación para la gestión integral de los residuos sólidos.
- Siddiqui, M., Everett, J., & Vieux, B. (1996). Landfill siting using geographic information systems: a demonstration. *ASCE*. doi:122:515-523
- Solano Peláez, J. L. (2011). Estructura de un modelo de gestión y calidad para el manejo de residuos peligrosos y hospitalarios de la empresa pública municipal mancomunada de aseo integral de la cuenca del Jubones "EMMAICJ-EP". Sangolquí.
- Tavares, G., Zsigraiová, Z., & Semiao, V. (2011). Multi-criteria GIS-based siting of a incineration plant for municipal solid waste. *Waste Management*. doi:10.1016/j.wasman.2011.04.013
- Yalcin, A. (2008). GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. *ScienceDirect*, 1-12.
- Zafra Mejía, C. A., Mendoza Castañeda, F. A., & Montoya Varela, P. A. (27 de Febrero de 2012). Metodología para la localización de rellenos sanitarios mediante sistemas de información geográfica. Un caso regional colombiano. *Revista Ingeniería e Investigación*, 32(1), 64-70. Obtenido de <https://www.researchgate.net/publication/260767427>
- Zafra Mejía, C. A. (Agosto de 2009). Metodología de diseño para la recogida de residuos sólidos urbanos mediante factores punta de generación: sistema de caja fija (SCF). *Revista Ingeniería e Investigación*, 19(2), 119-126.
- Zapata Muñoz, A., & Zapata Sanchez, C. (Agosto de 2013). Un método de gestión ambiental para evaluar rellenos sanitarios. *Gestión y Ambiente*, 16(2), 105-120. doi:0124.177X.



# Bosques de la Región Amazónica Ecuatoriana: ¿Qué nos dicen las cifras de deforestación de los últimos 15 años?

Borja María Olga<sup>1</sup>, Aragón-Osejo José<sup>2</sup>, Josse Carmen<sup>3</sup>

1 Fundación EcoCiencia  
San Ignacio y Humboldt E12-143/  
Quito/Pichincha/Ecuador  
maolgaborja@gmail.com

2 Fundación EcoCiencia  
San Ignacio y Humboldt E12-143/  
Quito/Pichincha/Ecuador  
sig@ecociencia.org

3 Fundación EcoCiencia  
San Ignacio y Humboldt E12-143/  
Quito/Pichincha/Ecuador  
carmenjosse@ecociencia.org

## RESUMEN

El bosque de la cuenca del Río Amazonas, bosque tropical continuo más extenso del mundo, almacena grandes cantidades de carbono, alberga pueblos indígenas y colonos, y provee servicios ecosistémicos de importancia global. A pesar de varias iniciativas, la deforestación, una de las principales fuentes de emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, continúa sin disminución. Los análisis indican que la Región Amazónica Ecuatoriana (RAE) ha perdido 1.1% de sus bosques en el último quinquenio 2010-2015, lo que implica una reducción de la deforestación con respecto al quinquenio anterior 2005-2010 de -12%, tendencia similar a la de la Cuenca Amazónica. El análisis demuestra que existió una reducción de la deforestación en Territorios Indígenas (TI, -16%) y en Áreas Naturales Protegidas (ANP, -3%), mientras que en áreas de ANP sin solapamiento con TI ha aumentado (+18%), contrario a la tendencia general. En áreas de solapamiento entre ANP y TI la deforestación ha disminuido (-35%) al igual que en las áreas fuera de ANP y/o TI (-15%).

La preocupación frente a este tema ha convocado la participación de organizaciones científicas en el desarrollo de metodologías para generar información estandarizada sobre las dinámicas de la pérdida de bosque a nivel panamazónico. En este marco, EcoCiencia, como parte de la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG), ha producido análisis quinquenales de deforestación (2000-2015) para la RAE, mediante un protocolo metodológico compartido por los 9 países de la cuenca, basados en clasificación de imágenes satelitales y herramientas de procesamiento en la nube.

Palabras clave: **Cuenca Amazónica, deforestación, sensores remotos.**

## ABSTRACT

*The Amazon River Basin Forest, the world's largest continuous tropical forest, stores large amounts of carbon, shelters indigenous peoples and settlers, and provides ecosystem services of global significance. Despite several initiatives, deforestation, which represents one of the main sources of anthropogenic emissions of greenhouse gases, continues unabated at the global level. Our analysis indicates that the Ecuadorian Amazonian Region (RAE) has lost 1.1% of its forests in the last five years 2010-2015, which implies a -12%*

*reduction of deforestation in relation to the previous five-year period 2005-2010, a trend similar to that of the Amazon basin. The analysis of deforested areas between these five-year periods shows that deforestation declined within Indigenous Territories (-16%) and within Natural Protected Areas (-3%). However, this latter value combines a decrease in deforestation in areas of overlap between ANP and IT (-35%) and an increase in ANP areas without overlap with IT (+18%). The areas outside ANP and / or IT had a decrease of -15%.*

*Concern about this issue has called for the active participation of scientific organizations in the development of methodologies to understand and generate standardized information on the dynamics of forest loss at the Pan-Amazonian level. Within this framework, EcoCiencia Foundation, as part of the RAISG, has produced deforestation analyzes for three five-year periods from 2000 to 2015 for the RAE through a methodological protocol shared by the 9 countries of the basin, based on automated classification of satellite imagery and, more recently, cloud processing tools.*

**Keywords:** Amazon basin, deforestation, remote sensing.

## I. INTRODUCCIÓN

La Cuenca Amazónica es un espacio de inmensa riqueza cultural y ambiental. Como la define la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG), comprende alrededor de 7.78\*106 km<sup>2</sup> y es compartida por 9 países (Brasil, Bolivia, Colombia, Ecuador, Guayana Francesa, Guyana, Perú, Surinam y Venezuela). Esta extensión cubre un rango altitudinal que va desde 0 hasta aproximadamente 5690 m.s.n.m. (Jarvis, Reuter, Nelson, & Guevara, 2008), con precipitaciones entre 1500 y 3000 mm anuales (Salati & Vose, 1984). La Amazonía alberga a más de 300 nacionalidades indígenas (RAISG, 2017), cuyos territorios cubren 27.5% del bioma (RAISG, 2016a). Para estos habitantes, como para el resto del mundo, la Amazonía provee una amplia variedad de Servicios Ecosistémicos (SE), algunos relacionados con la provisión de aire puro, agua, alimentos, la regulación hidrológica y otros con aspectos culturales y de identidad (Cuenca, Arriagada, & Echeverría, 2016; Kaphengst et al., 2014; McAlpine & Wotton, 2009). El territorio integra países con procesos históricos semejantes de colonización y transformación de la región amazónica.

Incrementos en la pérdida de este bosque por deforestación podrían provocar procesos de erosión, alteración del balance de calor atmosférico y evapotranspiración, reducción de las precipitaciones, con implicaciones climáticas regionales y globales, entre otros cambios que no se pueden prever (Salati & Vose, 1984). La alteración de la cuenca tendría consecuencias en el Cambio Climático (CC) de origen antropogénico, tema que concita la atención mundial. La perspectiva de un deterioro ambiental que comprometa la sobrevivencia del humano ha enfocado los esfuerzos por su mitigación mediante la reducción de emisiones de los gases de efecto invernadero, causados por la deforestación y degradación que liberan a la atmósfera el carbono almacenado en los bosques, por lo se ha dado mucha importancia a la protección de los remanentes de bosque y el equilibrio ecológico. Para analizar la Cuenca Amazónica es necesario entenderla desde una perspectiva panamazónica, donde se la considere en toda su extensión.

La preocupación por la Cuenca Amazónica se manifiesta en la discusión manejada a nivel internacional. En 2005 la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio de las Naciones Unidas menciona el éxito de alrededor de 100,000 Áreas Naturales Protegidas (ANP) en la disminución del proceso de degradación de los SE y de la biodiversidad (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). La importancia dada al mecanismo de las ANP se ratifica en el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CBD), que los países de la Cuenca Amazónica han firmado y ratificado. En la edición de 2010 de la Conferencia de las Partes (COP) del Convenio sobre la Diversidad Biológica (máximo

órgano del CBD) se propuso la denominada meta 11 de AICHI: “para 2020, al menos el 17% de las zonas terrestres y de las aguas interiores y el 10% de las zonas marinas y costeras, especialmente las que revisten particular importancia para la diversidad biológica y los servicios de los ecosistemas, se habrán conservado por medio de sistemas de áreas protegidas administrados de manera eficaz y equitativa, ecológicamente representativos y bien conectados, y de otras medidas de conservación eficaces basadas en áreas, y estas estarán integradas a los paisajes terrestres y marinos más amplios” (Convention on Biological Diversity, 2010).

Los objetivos de conservación de las ANP amazónicas se ven complementados por los Territorios Indígenas (TI), que, sin ser unidades legales de conservación, han venido cumpliendo un rol de protección de los bosques que en ellos se encuentran, funcionando como fronteras humanas a la expansión de la deforestación (Nepstad et al., 2006), efecto que se ve potencializado cuando los derechos sobre la tenencia de esas tierras han sido asegurados (Ding et al., 2016; Nagendra, 2007; Sunderlin, Larson, & Cronkleton, 2009). En el caso de los TI, la participación de los pueblos indígenas en formas exitosas de gobernanza con respecto a la conservación de bosques se ha debatido en diferentes espacios, en vista de la particular relación que tienen con sus tierras, y de sus prácticas tradicionales agroforestales y de subsistencia (Bremner & Lu, 2006; Davis & Wali, 1994; OEA, 2010; Roldán, 2004). Las diferentes organizaciones indígenas han estado presentes cada vez más en las COP, particularmente en las del Convenio Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, y son consideradas parte fundamental en la discusión sobre políticas de REDD+. Particularmente con relación a su potencial de mitigación de cambio climático, se ha reconocido que los TI amazónicos almacenan un tercio del carbono total de la Cuenca Amazónica, cantidad mayor a aquella almacenada en los bosques de República del Congo o de Indonesia (Walker et al., 2014).

Estas unidades o categorías de protección (ANP y TI) son parte del análisis espacial de las dinámicas de pérdida del bosque que lleva adelante la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG), de la cual la Fundación EcoCiencia forma parte junto con otras organizaciones de la sociedad civil de los diferentes países amazónicos.

Actualmente existen varias fuentes de datos sobre deforestación. Uno de los ejemplos más representativos a nivel global es el “Mapa Global de Alta Resolución del Siglo XXI de Cambio de la Cobertura de Bosque” (Hansen et al., 2013), que se generó a partir de imágenes Landsat 7 mediante el programa Google Earth Engine. Este mapa ha servido de referencia en diversidad de estudios sobre las dinámicas de deforestación debido

a su carácter global y accesibilidad, aunque se pueden dar discrepancias con otras fuentes de información. A nivel nacional, varios países tienen sus propios procesos de monitoreo de la deforestación. El Ministerio del Ambiente de Ecuador, mediante el Sistema Único de Información Ambiental, puso a disposición las coberturas de deforestación para los periodos 1990-2000, 2000-2008 y 2008-2014 (<http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/>) como fuente oficial de datos sobre deforestación. El mapa de Cobertura y Uso de la Tierra del Ecuador Continental 2013-2014, utilizado como insumo para las coberturas de deforestación mencionadas, se generó desde imágenes Landsat 8 y RapidEye (MAE-MAGAP, 2015).

Tradicionalmente, los esfuerzos de mapeo de la deforestación han implicado grandes inversiones en términos de recursos, personal y tiempo, sin embargo diferencias en la metodología, recursos y temporalidad de cada estudio se ven reflejadas en diferencias en los resultados. La RAISG, ha trabajado con el fin de alcanzar una mirada espacial panamazónica de los procesos de cambios que están sufriendo los bosques amazónicos. Los análisis de la RAISG permiten comparar los procesos de deforestación del Ecuador con respecto al resto de países. A nivel subnacional, el actual estudio reporta las dinámicas de deforestación tanto a nivel de la RAE, como dentro y fuera de territorios considerados como categorías de protección (TI y ANP).

Los objetivos del presente estudio son 1) reconstruir en mapas temáticos el proceso de deforestación ocurrido en la Región Amazónica Ecuatoriana (RAE) a partir del año 2000, en periodos de cinco años (2000 a 2005, 2005 a 2010 y 2010 a 2015); 2) estimar la extensión de la deforestación tanto a nivel regional (RAE) como subregionalmente, empleando los TI y las ANP como unidades de análisis; y 3) estimar la precisión de los mapas temáticos generados.

## II. MÉTODO

### A. ÁREA DE ESTUDIO

En Ecuador la Amazonía se define oficialmente siguiendo el límite político-administrativo (provincias) y cubre 116.270 km<sup>2</sup>, que representan 46,8% de la superficie del país (López-Acevedo, Aragón-Osejo, & Ulloa, 2015) y menos del 2% de la macrocuenca. Desde una perspectiva biogeográfica la Amazonía ecuatoriana empieza en las estribaciones de la Cordillera de los Andes, donde bosques transicionales andino-amazónicos ocurren a partir de los 1300 m.s.n.m. aproximadamente. En sus partes más bajas, la RAE puede llegar hasta los 150 m.s.n.m. Sin embargo, dentro de este territorio existen cordilleras propiamente amazónicas, cuyas cumbres pueden llegar a altitudes de hasta 3100 m.s.n.m. (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013b). La Amazonía ecuatoriana comprende 5 sectores biogeográficos y 22 ecosistemas que según el Mapa de Ecosistemas del Ecuador Continental (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013a), incluyen arbustales, bosques inundables e inundados, vegetación lacustre, bosque semidecídulo, bosque siempreverde de penillanura, de llanura, montano, piemontano, bosques sobre mesetas de areniscas de la Cordillera del Cóndor y herbazales inundables y montanos. Estos bosques se caracterizan por ser bosques densos y con altos niveles de diversidad y endemismo. La topografía varía, de plana en el Este a escarpada, conforme se aproxima a la Cordillera de los Andes al Oeste y en sus cordilleras. Para este estudio se utiliza el límite biogeográfico, mostrado en la Figura 1 junto con el límite político-administrativo, junto con áreas de TI, ANP y zonas de solapamiento entre ambos.

El presente documento reporta resultados de análisis únicamente con respecto a la porción ecuatoriana, utilizando la metodología RAISG para monitoreo de deforestación. La RAISG ha desarrollado protocolos y metodologías para la recopilación de información sobre los temas de mayor relevancia en las dinámicas de pérdida del bosque amazónico y la generación de información (detección y mapeo) de deforestación empleando una metodología estandarizada y compartida para los 9 países de la cuenca amazónica. La base de datos de la RAISG recopila la información más reciente en cada país de presiones y amenazas sobre los bosques (e.g. minería, petróleo, vías, fuego). La información compilada y generada ha sido difundida mediante publicaciones referentes al estado de la cuenca amazónica en diversos temas tales como mapas de avance de la deforestación, atlas de presiones y amenazas en la Amazonía, los procesos históricos de creación de ANP y reconocimiento de TI, y contenido de carbono en estos territorios (todos disponibles para descarga en su página web [www.amazoniasocioambiental.org](http://www.amazoniasocioambiental.org)).

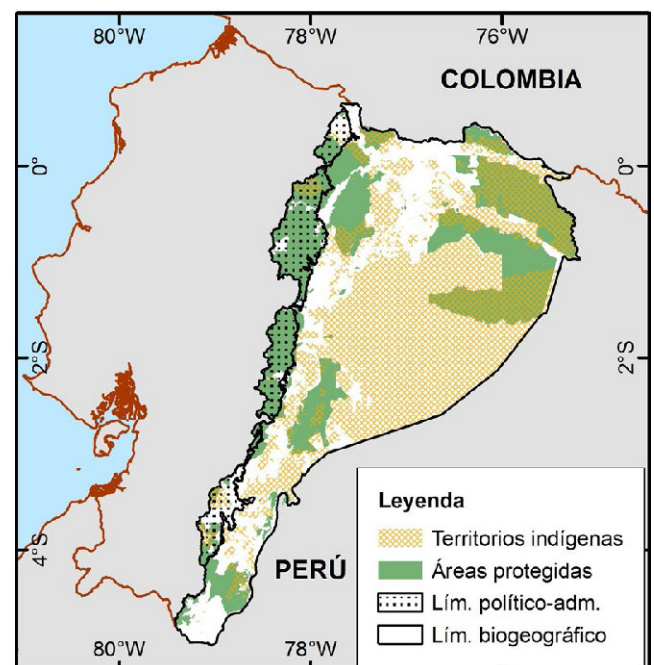


Figura 1: Mapa del área de estudio o RAE.

### B. MATERIALES

Empleamos 105 imágenes satelitales del sensor Landsat Thematic Mapper 5 (TM), Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) con sus bandas multispectrales 1-5 y 7, y Landsat Operational Land Imager y Thermal Infrared Sensor (OLI/TIRS), con sus bandas 1-7 y 9-10 adquiridas entre 1998 y 2015, para las 11 escenas (path-row) Landsat que cubren la RAE. La resolución espacial de las imágenes es de 30 m, suficientemente fina para detectar cambios en el bosque menores a 1 ha (1 pixel Landsat = 0.09 ha aproximadamente). Se definieron los periodos de análisis 2000-2005, 2005-2010, 2010-2013 y 2013-2015, aunque posteriormente los resultados de estos dos últimos periodos fueron integrados en uno solo, con lo cual se uniformó el análisis a 3 quinquenios. Debido a la alta nubosidad de la zona se definió una ventana de búsqueda con rango mínimo y máximo de fechas a partir del cual se seleccionó aquella imagen o imágenes con la menor cobertura de nubes. Las imágenes de 2000, 2005 y 2010 fueron descargadas sin costo de las siguientes fuentes: Glovis (<http://glovis.usgs.gov/>) y EarthExplorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). En el caso del

mapa 2015, las imágenes fueron accedidas a través del catálogo en Google Earth Engine (plataforma en la nube para análisis de imágenes de sensores remotos) y se compuso un mosaico anual (i.e. se generó una imagen compuesta por la mediana de los mejores píxeles de imágenes de ese año, de tal modo que píxeles con cobertura de nube fueron remplazados por la mediana de píxeles sin cobertura de nubes de otras imágenes), mejorando significativamente la cobertura de datos.

Adicionalmente, fueron empleadas imágenes de alta resolución capturadas desde Google Earth y georreferenciadas, de fechas de adquisición muy cercanas a las imágenes empleadas para realizar la estimación de la precisión de los datos 2000 a 2010. El método de procesamiento, interpretación y clasificación de series de datos espaciales y temporales Landsat empleado para este estudio se basa en aquel descrito en Souza Jr., Roberts, & Cochrane (2005), Souza Jr. & Siqueira (2013) y Souza Jr. et al. (2013).

Los análisis de categorías de conservación consideraron las coberturas oficiales de Patrimonio de Áreas Naturales del Estado, Bosques Protectores y del Subsistema Autónomo Descentralizado en el caso de ANP (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2015), y la cobertura de Territorios Indígenas Amazónicos de EcoCiencia (Fundación EcoCiencia, 2015).

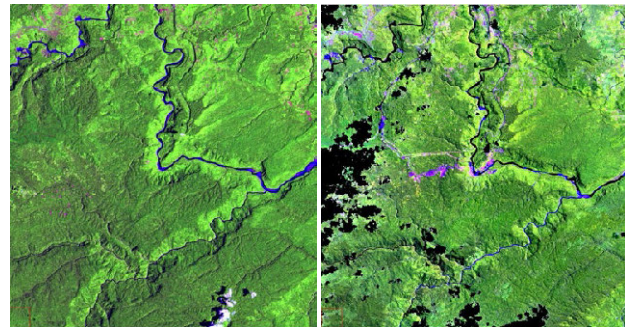
### C. PROCESO METODOLÓGICO

La metodología usada se basa en el uso de Modelos de Mezcla Espectral (MME) que descomponen la mezcla espectral comúnmente encontrada en los valores de reflectancia de cada píxel de una imagen adquirida por sensores remotos, en fracciones de materiales puros, conocidos como endmembers (Souza & Siqueira, 2013). Un MME normaliza los datos al generar imágenes de fracciones que son comparables entre distintos sensores, evitando así dificultades relacionadas a valores de reflectancia de bandas que ocupan regiones espectrales diferentes y que no han sido intercalibradas (Souza & Siqueira, 2013). El Índice Normalizado de Diferencia de Fracción (Normalized Difference Fraction Index – NDFI) (Souza Jr., Roberts, & Cochrane, 2005) fue propuesto para realzar la señal de tala selectiva y quemadas, facilitando la identificación y detección de degradación forestal. Para ello integra fracciones derivadas de un modelo de mezcla espectral (MME) que hasta ese entonces habían sido usadas independientemente y que son esperadas en ambientes forestales como GV, NPV, Sombra y Suelo (Souza & Siqueira, 2013).

Este método ha sido aplicado exitosamente para bosques amazónicos brasileños (Souza Jr., Roberts, & Cochrane, 2005; Souza Jr., Roberts, & Monteiro, 2005) y fue integrado en un paquete de software desarrollado por el Instituto Imazon (Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia, <http://imazon.org.br>) llamado ImgTools, junto con un algoritmo clasificador genérico (Souza & Siqueira, 2013). El ImgTools es un software escrito en IDL (Interactive Data Language, Exelis Visual Information Solutions, Boulder, Colorado) que integra una cadena de pasos fundamentales para el procesamiento y clasificación de imágenes satelitales con el fin de mapear cambios de cobertura forestal. Fue diseñado originalmente para apoyar el trabajo de Imazon en Brasil pero las fronteras de su aplicación han sido expandidas por una amplia comunidad de usuarios, entre ellos la RAISG.

Para el presente proyecto, bosque se define como un área de cobertura boscosa de dosel tupido, maduro y natural, existente en el área biogeográfica de la Amazonía ecuatoriana. Adicionalmente a la definición de bosque, cobertura forestal viene a ser definida por lo que puede ser detectado con sensores

remotos y clasificada como tal empleando las varias técnicas de procesamiento y clasificación de los datos. La cobertura boscosa y cambio en la misma fue mapeada. La detección de cambio se realizó en comparación al último mapa de deforestación actualizado, donde el año de línea base es 2000, actualizado al 2005, 2010, 2013 y actualmente al 2015.



a) 2002

b) 2015

Figura 2: La utilidad de las imágenes satelitales para la detección de deforestación se puede apreciar al comparar dos imágenes de un mismo sitio en diferentes fechas, en a) son áreas de bosque en 2002 (tonos verde) que en b) 2015 al ser deforestadas tras la construcción de la central hidroeléctrica Coca Codo Sinclair toman tonos de color violeta (zonas negras corresponden a falta de datos debido a nubosidad). (Imágenes Landsat, RGB: 543).

La deforestación es el efecto de diferentes fuentes de presiones existentes sobre los bosques, como pueden ser vías, minería, petróleo, fuegos, hidroeléctricas, etc. Para nuestros fines, definimos deforestación como un proceso continuo de conversión de tierras forestales a otros usos de la tierra, tales como pastizales, campos agrícolas, minería o áreas de expansión urbana donde se da una remoción casi total de la cobertura forestal original (Souza et al., 2013) (Figura 2).

La metodología empleada para este estudio, tiene la potencialidad de ser empleada para el mapeo simultáneo tanto de deforestación como de degradación forestal (Souza et al., 2013); sin embargo, como producto del esfuerzo regional panamazónico de la RAISG en el que se enmarca este estudio, la metodología fue aplicada para la totalidad del bioma amazónico para el mapeo de deforestación únicamente. La mayoría de las rutinas de la siguiente cadena de procesamiento se encuentran implementadas en el software ImgTools que para el mapa 2015 migró al code editor de Google Earth Engine.

#### a. Preprocesamiento

Las imágenes fueron corregistradas empleando las herramientas disponibles en el paquete comercial para visualización de imágenes ENVI 4.7 (Environment for Visualizing Images, Exelis Visual Information Solutions, Boulder, Colorado) con relación a la imagen referencial del año 2000, con el propósito de asegurar una alta correspondencia entre los píxeles de imágenes de distintos años. Un corregistro de alta precisión (i.e. error menor a 1 píxel) es un requisito esencial para la detección de cambio de coberturas en sets temporales de datos.

#### b. Corrección radiométrica y atmosférica

La imagen fue convertida de números digitales a valores de radiancia usando ImgTools, a partir de los valores de gains y offsets provistos en la metadata de la imagen. Posteriormente, la imagen de radiancia fue corregida atmosféricamente y transformada a valores de reflectancia empleando el módulo FLAASH para corrección atmosférica, disponible en ENVI (fuera de ImgTools), usando parámetros de visibilidad y vapor

de agua estimados por prueba y error. Las correcciones debidas al ruido atmosférico relacionado a bruma (haze) y humo fueron realizadas con la técnica propuesta por Carlotto (1999), implementada en ImgTools (Souza & Siqueira, 2013). Más detalles sobre esta técnica pueden ser encontrados en Souza et al., (2013) y Souza & Siqueira (2013).

#### c. Modelo de Mezcla Espectral

Un análisis de mezcla espectral asume que el espectro de una imagen está formado por la combinación lineal de  $n$  espectros puros (ecuaciones 1 y 2), de tal modo que:

$$R_b = \sum_{i=1}^n F_i R_{i,b} + \varepsilon_b \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^n F_i = 1 \quad (2)$$

donde  $R_b$  es la reflectancia en la banda  $b$ ,  $R_{i,b}$  es la reflectancia del endmember  $i$ , en la banda  $b$ ,  $F_i$  es la fracción del endmember  $i$ , y  $\varepsilon_b$  es el error residual de cada banda. El error del modelo es estimado para cada pixel al calcular el error RMS (ecuación 3) del siguiente modo:

$$RMS = \left[ n^{-1} \sum_{b=1}^n \varepsilon_b^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Frente al limitante de tener que adquirir endmembers de referencia y contar con una biblioteca espectral amplia y bien calibrada de los tipos de uso de suelo representativos del área de estudio como insumo esencial para la generación de un Modelo de Mezcla Espectral (MME), Small (2004) propuso un enfoque alternativo que abrió la posibilidad de generar endmembers genéricos y por lo tanto fracciones espectrales estandarizadas y consistentes globalmente, indistintamente del sensor empleado.

Los valores de reflectancia de cada pixel de las imágenes Landsat TM/ETM+/OLI fueron descompuestos en fracciones de Vegetación Verde (Green Vegetation, GV), Vegetación No-Fotosintética (Non-Photosynthetic Vegetation, NPV), Suelo y Sombra mediante un MME. Estos cuatro tipos de fracciones son los esperados en ambientes forestales y sus proporciones varían dependiendo del grado de intervención de los mismos (Souza Jr. et al., 2013; Souza Jr., Roberts, & Cochrane, 2005). Bosques que han sido talados selectivamente o quemados tienen proporciones de GV menores, y mayores proporciones de NPV y suelo en relación a bosques intactos (Cochrane & Souza Jr., 1998; Souza Jr., Roberts, & Cochrane, 2005). La fracción de sombra de bosques degradados es también mayor a aquella de bosques intactos (Souza Jr., Roberts, & Cochrane, 2005).

#### d. Cálculo del NDFI

El Índice Normalizado de Diferencia de Fracción (Normalized Difference Fraction Index -NDFI) fue propuesto por Souza Jr., Roberts, & Cochrane (2005) como un método que provee información espectral sensible a cambios en el dosel del bosque y sintetiza, en una sola banda, información espectral que ha sido identificada como relevante para la identificación de degradación en bosques amazónicos (Souza Jr., Roberts, & Cochrane, 2005). El NDFI es calculado a partir de las imágenes de fracciones obtenidas del MME (ecuaciones 4 y 5):

$$NDFI = \frac{GV_{shade} - (NPV + Soil)}{GV_{shade} + (NPV + Soil)} \quad (4)$$

donde

$$GV_{shade} = \frac{GV}{100 - Shade} \quad (5)$$

Los valores de NDFI tienen un rango de -1 a 1 (posteriormente reescalados a un rango de 0 a 200). En relación a la señal espectral de un bosque intacto, el NDFI tiene la capacidad de realzar la señal de degradación forestal, reflejando cambios más drásticamente que los cambios que se observarían por el uso individual de fracciones espectrales obtenidas por el MME (Souza Jr., Roberts, & Cochrane, 2005). Los valores de NDFI en bosques intactos se espera que sean altos, cercanos a 1 (NDFI > 0.75), debido a una combinación de altos valores de  $GV_{shade}$ , producto de un alto GV y sombra del dosel, junto con valores bajos de NPV y suelo. Conforme un bosque es degradado, los valores de las fracciones de NPV (wood debris) y Suelo incrementan, lo cual hace que el valor de índice se reduzca en relación a aquel de un bosque intacto. Valores entre  $0 < NDFI < 0.75$  son asociados con daños en el dosel del bosque. Áreas con valores negativos de NDFI son asociadas con áreas que han sido completamente deforestadas (clear-cut) (Souza Jr., Roberts, & Cochrane, 2005).

#### e. Generación de máscaras de agua, nubes y sombras

ImgTools detecta y mapea cuerpos de agua empleando las fracciones de GV, Sombra y Suelo, produce una imagen o máscara de agua con valores de 1 (agua) y 0 (no agua). La aplicación opcional de un filtro espacial facilita la eliminación de pixeles aislados. La sombra relacionada a la topografía del terreno suele generar errores en la clasificación que luego deben ser editados manualmente. A partir de la migración de la metodología a Google Earth Engine en 2015, se incorporó el uso de una capa de relieve de terreno que redujo en gran medida este error. Sin embargo, el mapeo de ríos pequeños y encañonados, como tiende a ocurrir en las partes de la Amazonía de estribación de cordillera, es todavía un reto.

ImgTools también produce una máscara de nubes y sombras con valores de 1 (sombra), 2 (nube) y 0 (no nube). La fracción espectral de nube fue implementada específicamente para apoyar la identificación de nubes. Adicionalmente, se usa como insumo la fracción de Sombra. Filtros espaciales y buffers pueden ser aplicados para mejorar la definición de las nubes (Souza & Siqueira, 2013). A partir de 2013 se incluyó la posibilidad de usar la banda 10 o termal de Landsat 8, como apoyo para la definición de la máscara de nubes.

#### f. Clasificación empleando árboles de decisión y detección de cambio

Mediante la herramienta de clasificación por árbol de decisión implementada en ImgTools y posteriormente en Google Earth Engine, se empleó reglas jerárquicas de clasificación en un proceso de partición binaria recursiva que usa como insumo las imágenes de fracciones (Souza & Siqueira, 2013). Por ejemplo, el nodo del árbol cuya variable se basa en los valores de  $GV_{shade}$  provee información sobre la abundancia de vegetación fotosintéticamente activa en un pixel y apoya a la distinción entre áreas forestadas y no forestadas. Pixeles con valores  $GV_{shade} \geq 85\%$  están asociados a cultivos y bosques jóvenes o de crecimiento secundario que, para nuestros fines, son clasificados como deforestación (i.e. áreas previamente

deforestadas). Otro nodo aplica los valores de NDFI, donde sólo aquellos píxeles que satisfacen la variable ( $VNDFI \geq 180$ ) son clasificados como bosque (Souza et al., 2013).

El proceso se apoya en el uso de la imagen de reflectancia como referencia para quien hace la interpretación. El producto es una imagen ráster con las siguientes clases temáticas: bosque (1), no bosque (4), agua (5), nube (6) y deforestación (7). ImgTools tiene la capacidad de generar adicionalmente las clases regeneración (2) y degradación (3), pero éstas no han sido aplicadas en el contexto de la RAISG.

A partir de la imagen del año 2000 se generó una línea base de bosque en la que se distinguió áreas originalmente cubiertas por ecosistemas boscosos (i.e. sujetas a ser deforestadas) de áreas no boscosas. Para ello se empleó el mapa de ecosistemas del Ministerio de Ambiente de Ecuador (Ministerio del Ambiente del Ecuador, 2013a). La línea base sirvió como insumo para la detección de cambio (i.e. deforestación) en años posteriores.

A partir del mapa 2005, una vez que un píxel es clasificado como “deforestación”, este pasa a formar parte de la clase “no-bosque” en un siguiente periodo de análisis (i.e. actualiza la línea base). Con ello se busca evitar que una misma área sea contabilizada dos veces. Al momento no se ha incluido en el contexto de la RAISG la contabilidad de áreas regeneradas.

Para la generación del mapa 2015 se incorporó la posibilidad de subdividir una escena por rangos de altitudes y de aplicar distintos parámetros de clasificación del árbol de decisión a cada subregión, fortaleciendo el mapeo en áreas de altitud que habían sido problemáticas anteriormente.

g. Revisión y ajuste de fuentes de error (edición manual de máscaras y clasificación)

Las clasificaciones generadas fueron inspeccionadas y editadas manualmente por analistas con el propósito de corregir errores residuales o clasificaciones erradas.

h. Posclasificación: aplicación de filtro temporal

El proceso de posclasificación incluye la aplicación de filtros espaciales y temporales, ambos implementados en ImgTools. Los filtros espaciales tienen la capacidad de reducir ruido en la clasificación. A partir de la definición de un tamaño mínimo o área mínima aceptada para una clase dada, se identifican píxeles individuales aislados, los cuales son substituidos por la clase predominante en su vecindad inmediata (Souza et al., 2013).

Por otro lado, los filtros temporales fueron creados con el propósito de evitar transiciones no permitidas en la serie temporal clasificada (Souza & Siqueira, 2013). Mediante la definición y aplicación de reglas de transiciones aceptadas, los filtros temporales tienen la capacidad de mejorar la calidad de los datos, reduciendo vacíos de información debido a nubes cuando es posible. Por ejemplo, si un píxel ha sido clasificado como bosque en un punto inicial en el tiempo  $t_1$ , como nube en  $t_2$ , y nuevamente como bosque en  $t_3$ , sería seguro asumir que en el periodo intermedio  $t_2$  se mantuvo como bosque. De este modo, un píxel de nube puede ser remplazado y reasignado a una clase más apropiada (Souza Jr. et al., 2013; Souza Jr. & Siqueira, 2013).

i. Estimación de la precisión

Se estimó la precisión de los productos clasificados (mapas temáticos de deforestación) de los años 2000, 2005 y 2010 (no se incluyó el mapa 2015) siguiendo el método descrito en Powell et al. (2004) y Souza Jr. et al. (2013). Esta evaluación se realizó con el apoyo de un set de datos de referencia comprendido por imá-

genes satelitales de muy alta resolución adquiridas entre 2002 y 2011 (cuidando que estos datos de referencia sean de fechas que coincidan con la fecha de la imagen Landsat clasificada).

El protocolo de estimación de la precisión incluyó la definición y diseño de una muestra estratificada para las clases bosque ( $n=198$ ), no bosque ( $n=226$ ), agua ( $n=60$ ) y deforestación ( $n=290$ ). A partir de puntos aleatorios generados en ArcMap, se crearon bloques de 5 píxeles de 30 m, cada uno correspondientes a un píxel Landsat (Figura 3), de tal modo que cada píxel o unidad de muestreo corresponda con la unidad del mapa objetivo. Un total de 155 puntos fueron generados, cubriendo 775 celdas o píxeles.



Figura 3: Ejemplo de un bloque (5 píxeles) utilizado para evaluación de precisión, sobre una imagen de alta resolución.

Un intérprete independiente evaluó cada unidad de muestreo usando los datos de referencia (imágenes de alta resolución), y estimó el porcentaje ocupado por cada clase temática posible (bosque, no bosque/deforestación, agua).

Los valores de error inicial fueron empleados para mejorar el esfuerzo de muestreo hasta asegurar que se cumpla con un muestreo representativo de cada clase. Los resultados fueron incluidos en una matriz de error que compara el grado de acuerdo o desacuerdo (%) entre los datos de referencia y el producto clasificado o mapa temático. La matriz de error genera tanto medidas estadísticas descriptivas como analíticas (Powell et al., 2004). Las medidas descriptivas proveen al usuario potencial del producto clasificado de una medida de la confianza general, como también de la precisión por clase. Las medidas estadísticas analíticas de la precisión del mapa proveen un medio para comparar dos productos de mapas. Sin embargo, la interpretación de los resultados de la matriz de error debe hacerse con precaución, pues la medida de acuerdo o desacuerdo entre el mapa y los datos de referencia puede no ser necesariamente equivalente al grado de acuerdo entre el producto y la realidad en territorio (Foody, 1999).

j. Estimación de tasas de deforestación

Los resultados de los mapas fueron tabulados y usados para estimar valores de deforestación, que expresamos en términos de kilómetros cuadrados ( $km^2$ ) por quinquenio. Dado que no siempre fue posible adquirir imágenes para el año evaluado debido a la alta nubosidad de la región, lo cual fue exacerbado por el fallo del SLC (Scan Line Corrector) en el satélite Landsat ETM+, fue necesario proyectar los valores medidos empleando métodos matemáticos, de tal modo que los valores de deforestación fueron anualizados para normalizar la variabilidad en las fechas de adquisición de las imágenes y proveer de resultados comparables para los periodos quinquenales (Souza Jr. et al., 2013).

Debido a que en Brasil se ha estandarizado el uso de un periodo de referencia para estimar la deforestación anual que va del 1 del mes de Agosto al 31 del mes de Julio y dado que

este estudio conforma parte de un trabajo en red realizado a la par en todos los países de la cuenca, se decidió adoptar este mismo periodo de referencia para generar resultados comparables entre sí (Souza Jr. et al., 2013).

El cálculo de la tasa de pérdida de cobertura forestal (ecuación 6) se realiza de acuerdo a Puyravaud (2003), en la que se asume que el área de bosque perdido o deforestado decrece en el tiempo a una tasa exponencial dada por:

$$r_{(t-1,t)} = \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \right) \times \ln \left( \frac{A_{t_2}}{A_{t_1}} \right) \quad (6)$$

donde  $A_{t_1}$  y  $A_{t_2}$  son las áreas de bosque mapeadas en  $t_1$  y  $t_2$  expresadas en años, empezando con el año inicial ( $t_0 = 2000$ ). El resultado  $r_{(t-1,t)}$  representa la tasa porcentual de pérdida de bosque (percentage rate of forest loss) normalizada para un periodo entre  $t_2 - t_1$  (en años).

Con el valor  $r$  es posible calcular la tasa de deforestación anual ( $D_t$  en  $\text{km}^2/\text{año}$ ) para un periodo de referencia (ecuación 7):

$$D_t = A_{t-1} \times (1 - e^{r_{t-1,t}}) \quad (7)$$

Donde  $A$  es el área forestal proyectada u observada a la fecha de inicio del periodo de referencia de un año dado (e.g. 1 de Agosto de 2000). Para años subsiguientes,  $D_t$  es la tasa anual de deforestación normalizada para el periodo de referencia entre dos años y  $A_{t-1}$  está dado por  $A_{t-2} - D_{t-1}$  (Souza et al., 2013).

Para estimar los valores de pérdida de cobertura forestal en TI y ANP, aplicamos una máscara con los límites de éstos para cada escena Landsat, de tal modo que se utilizó este método únicamente a las porciones de la escena que correspondían a TI o ANP. Deforestación observada tras un vacío debido a cobertura de nube fue distribuida equitativamente entre los periodos de referencia cubiertos por nubes. En estos casos, se asumió que la tasa se mantuvo igual entre las observaciones.

El proceso de obtención de la cobertura de deforestación requiere de un intensivo trabajo de revisión y monitoreo de cada paso explicado anteriormente, lo que se realiza por técnicos con conocimiento de campo en cada país. Se presenta a continuación (Figura 4) un esquema de este proceso.

### III. RESULTADOS

Este estudio forma parte integral de un esfuerzo mayor y coordinado de mapeo de deforestación que ha sido realizado para la totalidad del bioma amazónico por instituciones de los distintos países que lo comparten; sin embargo, el presente

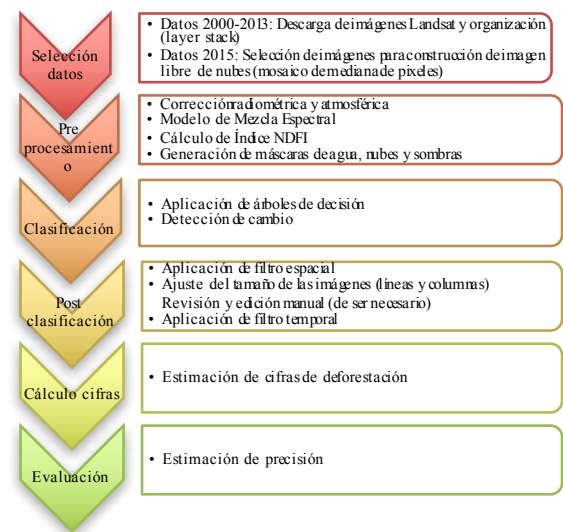


Figura 4: Resumen del proceso metodológico para la obtención de la cobertura de deforestación de la RAISG.

documento reporta los resultados obtenidos únicamente para la porción de la Amazonía ecuatoriana, los cuales presentamos a continuación.

#### A. BOSQUES ORIGINALES Y BOSQUES REMANENTES AL 2015 EN LA RAE

La presente evaluación ha sido realizada sobre la porción de la RAE que corresponde al bioma amazónico definido por la RAISG (límite biogeográfico de la RAE, Figura 1), el cual cubre una superficie estimada en 103,304  $\text{km}^2$ , o 40% del territorio continental del país. Para nuestro análisis, se estimó que del área total analizada, 93% (96,073  $\text{km}^2$ ) estaban cubiertos originalmente por ecosistemas boscosos (i.e. área boscosa original o bosque original) como se muestra en la Tabla 1.

De la extensión total de bosques originales de la región analizada, 47.28% (45,427  $\text{km}^2$ ) de los bosques originales amazónicos ecuatorianos se encontraron en áreas que son exclusivamente TI (i.e. sin solapamiento con ANP). Áreas que son exclusivamente ANP (i.e. sin solapamiento con TI) albergaban 14.56% (13,984  $\text{km}^2$ ) de los bosques originales amazónicos ecuatorianos, 16.43% (o 15,782  $\text{km}^2$ ) se encontraron en zonas donde existe un solapamiento de categorías de uso y posesión del suelo (i.e. son tanto ANP como TI) y 21.73% (20,880  $\text{km}^2$ ) en áreas que están fuera de TI y/o ANP (Tabla 1, Figura 1).

TABLA 1  
SÍNTESES DE RESULTADOS

	ÁREA BOSCO- SA ORIGINAL (ESTIMADA) KM <sup>2</sup>	DEFORESTACIÓN				PORCENTAJE DEL BOSQUE ORIGINAL DEFORESTA- DO ENTRE 2000-2015	PORCENTAJE TOTAL DE- FORESTADO DEL BOSQUE ORIGINAL	PORCENTAJE DEL BOSQUE REMA- NENTE AL 2000 DEFORESTADO ENTRE 2000-2015
		ACUMULADA (PREVIA AL 2000) KM <sup>2</sup>	2000-2005 KM <sup>2</sup>	2005-2010 KM <sup>2</sup>	2010-2015 KM <sup>2</sup>			
RAE (límite biogeográfico)	96,073	9,020	1053.62	1089.58	957.40	3.2	12.6	3.5
- TI*	61,209	2,816	482.27	426.99	356.37	2.1	6.7	2.2
- ANP*	29,766	480	239.42	204.76	197.34	2.2	3.8	2.2
- Fuera de ANP y TI	20,880	5,911	475.97	540.39	456.99	7.1	35.4	9.8

\* Los valores de extensión de TI y ANP incluyen las áreas de solapamiento entre estas dos categorías (i.e. donde es tanto TI como ANP).

De esta área boscosa original, 9.38% (9,020 km<sup>2</sup>) habían sido transformados (deforestados) previo al año 2000 (año de línea base). 3.2% adicional (3,100 km<sup>2</sup>) fue deforestado entre 2000 y 2015.

La extensión en km<sup>2</sup> del área boscosa original estimada en la RAE para las unidades de análisis (TI, ANP y fuera de TI/ANP), los valores de deforestación ocurrida en periodos anteriores al año 2000 (año de línea base del presente estudio), como para cada quinquenio analizado entre 2000 y 2015 y los porcentajes que estos valores representa en relación al bosque original y remanente al año 2000 se encuentran en la Tabla 1. La deforestación total detectada en la RAE en km<sup>2</sup> en cada quinquenio y el porcentaje que representa del total detectado entre 2000-2015 se resumen en la Tabla 2.

De estos valores, podemos destacar que las áreas que actualmente son TI en la RAE (áreas exclusivamente TI más áreas con solapamiento) contenían 63.7% (61,209 km<sup>2</sup>) de los bosques originales de la RAE en 59.25% del área de estudio total, de los cuales se ha deforestado 6.7% hasta 2015 (4,081 km<sup>2</sup>), 2.1% entre 2000 y 2015.

Por otro lado, áreas con reconocimiento legal de protección o ANP (áreas exclusivamente ANP más áreas con solapamiento) cubren el 31% (29,766 km<sup>2</sup>) de los bosques amazónicos originales de la RAE, de los cuales se han deforestado 3.8% al 2015 (1,221 km<sup>2</sup>), 2.2% entre 2000 y 2015.

Las áreas de la RAE que no tienen ninguna categoría de protección (i.e. están fuera de ANP y/o TI) contenían 21.7% (20,880 km<sup>2</sup>) de los bosques originales de la RAE, 35.4% de los cuales han sido deforestados al 2015, 7.1% de ellos, entre 2000 y 2015.

**TABLA 2**  
ÁREA DEFORESTADA EN LA RAE POR QUINQUENIO

	QUINQUENIO			TOTAL
	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2000-2015
<b>ÁREA (KM<sup>2</sup>)</b>	1053.62	1089.58	957.40	3100.60
<b>% DE LA DEFORESTACIÓN 2000-2015</b>	33.98%	35.14%	30.88%	100%

De la extensión total de deforestación detectada entre 2000 y 2015, el quinquenio 2005-2010 concentra la mayor porción de la deforestación (35.14%) y el quinquenio 2010-2015 la menor extensión de deforestación de todos: 957 km<sup>2</sup> (30.88% del total deforestado entre 2000 y 2015).

#### B. DEFORESTACIÓN EN ÁREAS NATURALES PROTEGIDAS (ANP) DE LA RAE

De los 3,100.60 km<sup>2</sup> deforestados entre 2000 y 2015 en la RAE, 641.52 km<sup>2</sup> ocurrieron en áreas naturales protegidas (ANP) a pesar de sus respectivas categorías de conservación. Las extensiones de deforestación dentro y fuera de ANP por quinquenio y porcentaje que representó de la deforestación total de cada quinquenio se resumen en la Tabla 3 y en la Figura 5.

**TABLA 3**  
ÁREA DEFORESTADA EN ANP POR QUINQUENIO

	DEFORESTACIÓN (KM <sup>2</sup> )			TOTAL
	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2000-2015
<b>DENTRO DE ANP</b>	239.42 (22.72%)	204.76 (18.79%)	197.34 (20.61%)	641.52 (20.69%)
<b>FUERA DE ANP</b>	814.21 (77.28%)	884.82 (81.21%)	760.05 (79.39%)	2459.08 (79.31%)
<b>TOTAL</b>	1053.63	1089.58	957.39	3100.60

Dentro de las ANP se perdió 0.7% de los 28,839 km<sup>2</sup> de área boscosa o bosques remanentes al año 2010 entre 2010-2015. Los valores de deforestación relativa al bosque remanente son mayores en áreas fuera de ANP que dentro de ANP (Tabla 4, Figura 5).

**TABLA 4**  
DEFORESTACIÓN 2010-2015 EN ANP SOBRE EL BOSQUE REMANENTE AL 2010

	ÁREA BOSCO-SA AL 2010 (KM <sup>2</sup> )	DEFORESTACIÓN 2010-2015 (KM <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE PÉRDIDA 2010-2015 SOBRE EL BOSQUE REMANENTE AL 2010
Áreas Naturales Protegidas	28,839	197.34	0.7 %

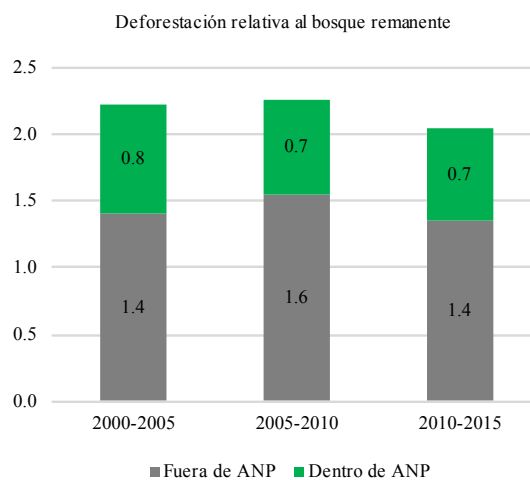


Figura 5: Porcentaje que la deforestación ocurrida dentro y fuera de ANP representa en relación al bosque remanente.

En la RAE, 25 de las 56 ANP experimentaron un incremento en su deforestación en 2010-2015 en relación a la deforestación del quinquenio anterior (Figura 6).



Figura 6: Mapa de las 25 ANP que experimentaron incremento en deforestación en 2010-2015 (elaboración propia). Las áreas en verde presentaron reducciones en su deforestación en el quinquenio 2010-2015 con respecto al quinquenio anterior. Las zonas que presentaron incrementos de deforestación se representan en gama de rojo, donde la intensidad es relativa a la magnitud del incremento.



Del total de la deforestación detectada en ANP en el primer quinquenio, 40% (95 km<sup>2</sup>) se dio en áreas sin solapamiento (i.e. exclusivamente ANP), valor que crece a 60% en el segundo quinquenio (122 km<sup>2</sup>) y a 73% (144 km<sup>2</sup>) en el último quinquenio (Tabla 5).

**TABLA 5**  
DEFORESTACIÓN EN ANP EN ÁREAS CON Y SIN SOLAPAMIENTO CON TI

	DEFORESTACIÓN (KM <sup>2</sup> )			TOTAL
	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2000-2015
<b>EXCLUSIVAMENTE ANP</b>	95.39 (40%)	122.21 (60%)	144.03 (73%)	361.62
<b>SOLAPAMIENTO ANP Y TI</b>	144.03 (60%)	82.55 (40%)	53.31 (27%)	279.90
<b>TOTAL</b>	239.42	204.76	197.34	645.35

La deforestación en áreas exclusivamente ANP (sin solapamiento) representó el 9% del total de la deforestación total ocurrida en la RAE durante el primer quinquenio, valor que subió a 11% en el segundo quinquenio y a 15% en el último quinquenio.

**C. DEFORESTACIÓN EN TERRITORIOS INDÍGENAS (TI) DE LA RAE**

De los 3,100.60 km<sup>2</sup> deforestados entre 2000 y 2015 en toda la RAE, 1,265.63 km<sup>2</sup> ocurrieron dentro de TI. Las extensiones de deforestación en km<sup>2</sup> dentro y fuera de TI por quinquenio y el porcentaje que representó de la deforestación total de cada quinquenio se resumen en la Tabla 6 y en la Figura 7.

**TABLA 6**  
ÁREA DEFORESTADA EN TI POR QUINQUENIO

	DEFORESTACIÓN (KM <sup>2</sup> )			TOTAL
	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2000-2015
<b>DENTRO DE TI</b>	482.27 (45.77%)	426.99 (39.19%)	356.37 (37.22%)	1265.63 (40.82%)
<b>FUERA DE TI</b>	571.36 (54.23%)	662.59 (60.81%)	601.02 (62.78%)	1834.97 (59.18%)
<b>TOTAL</b>	1053.63	1089.58	957.39	3100.60

Dentro de los TI se perdió 0.6% de los 57,484 km<sup>2</sup> de área boscosa o bosques remanentes al año 2010 entre 2010-2015 (Tabla 7, Figura 7). Los valores de deforestación relativa al bosque remanente son mayores en áreas fuera de TI que dentro de TI (Figura 7).

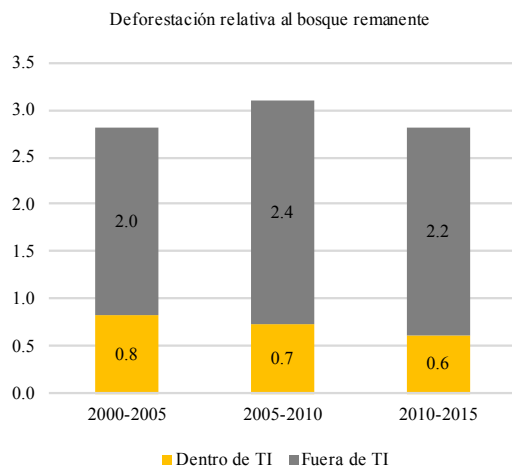


Figura 7: Porcentaje de la deforestación ocurrida dentro y fuera de TI con respecto al bosque remanente.

**TABLA 7**  
DEFORESTACIÓN 2010-2015 EN TI SOBRE EL BOSQUE REMANENTE AL 2010

	ÁREA BOSCO-SA AL 2010 (KM <sup>2</sup> )	DEFORESTA-CIÓN 2010-2015 (KM <sup>2</sup> )	PORCENTAJE DE PÉRDIDA 2010-2015 SOBRE EL BOSQUE REMANENTE AL 2010
Territorios Indígenas	57,484	356.37	0.6%
Zona Intangible	1,240	1.30	0.1%

Los territorios de las nacionalidades Kichwa amazónica y Shuar concentran el 83% de la deforestación ocurrida en TI entre 2000 y 2015 (45% en territorios Kichwa y 38% en territorios Shuar). El resto de nacionalidades presentan porcentajes mucho menores. La deforestación detectada entre 2000-2015 en TI, por nacionalidad indígena y el porcentaje que representa del total deforestado en todos los TI se resumen en la Tabla 8.

**TABLA 8**  
DEFORESTACIÓN POR NACIONALIDAD INDÍGENA DE LA RAE

NACIONALIDAD INDÍGENA	DEFORESTACIÓN 2000-2015		TERRITORIO*	
	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	%	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	% TI-RAE
Kichwa	568	44.90	22,911	35.1
Shuar	482	38.10	10,849	16.6
Achuar	61	4.82	6,863	10.5
Andoa	3	0.23	661	1.0
Cofán	59	4.74	2,684	4.1
Siona	30	2.35	1,378	2.1
Secoya	10	0.73	424	0.6
Sápara	10	0.79	3,684	5.6
Shiwiar	10	0.73	2,241	3.4
Worani	33	2.60	13,548	20.8
Total	1265.63	100	65,243	100

\* Valores obtenidos de Fundación EcoCiencia (2015).

En 3 de las 10 nacionalidades de la RAE la deforestación incrementó en 2010-2015 con relación al quinquenio anterior, correspondientes a los territorios de las nacionalidades Andoa, Cofán y Secoya. Estos incrementos son de apenas +1 km<sup>2</sup> en el caso de Andoas, +3 km<sup>2</sup> en territorio Cofán y +17 km<sup>2</sup> en territorio Secoya en periodos de 5 años. Juntos, estas nacionalidades representan 5.7% de la deforestación ocurrida en 2000-2015 (Figura 8).

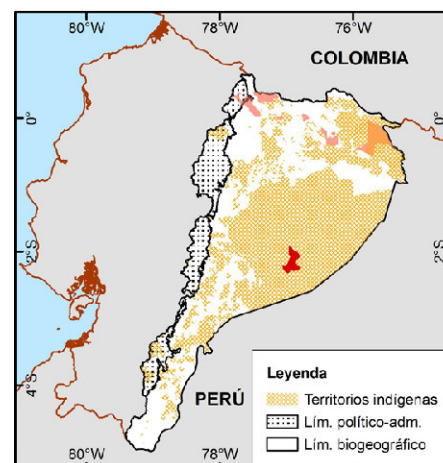


Figura 8: Mapa de las 3 nacionalidades donde la deforestación incrementó en 2010-2015 (elaboración propia). Las áreas en amarillo presentaron reducciones en su deforestación en el quinquenio 2010-2015 con respecto al quinquenio anterior. Las zonas que presentaron incrementos de deforestación se representan en gama de rojo.

Del total de la deforestación detectada en TI, 70% de la deforestación (338 km<sup>2</sup>) del primer quinquenio se dio en áreas sin solapamiento con ANP, valor que crece a 81% en el segundo quinquenio (344 km<sup>2</sup>) y a 85% (303 km<sup>2</sup>) en el último quinquenio. La deforestación en áreas exclusivamente TI (sin solapamiento) representó la tercera parte de la deforestación total ocurrida en la RAE para cada quinquenio (32, 32 y 31% respectivamente). Los valores de deforestación en TI en áreas sin y con solapamiento con ANP se presentan en la Tabla 9.

**TABLA 9**  
DEFORESTACIÓN EN TI EN ÁREAS CON Y SIN SOLAPAMIENTO CON ANP

	DEFORESTACIÓN (KM <sup>2</sup> )			TOTAL
	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2000-2015
<b>EXCLUSIVAMENTE ANP</b>	338.24 (70%)	344.43 (81%)	303.06 (85%)	985.73
<b>SOLAPAMIENTO ANP Y TI</b>	144.03 (30%)	82.55 (19%)	53.31 (15%)	279.90
<b>TOTAL</b>	482.27	426.99	356.37	1265.63

#### D. DEFORESTACIÓN 2000-2015 EN LAS DISTINTAS UNIDADES DE ANÁLISIS

De los 3,100.60 km<sup>2</sup> deforestados entre 2000 y 2015 en toda la RAE, 9% (280 km<sup>2</sup>) ocurrió dentro de áreas de solapamiento entre TI y ANP, 12% (362 km<sup>2</sup>) se encontró en áreas que son exclusivamente ANP, 32% (986 km<sup>2</sup>) en áreas exclusivamente de TI, y 48% (1473 km<sup>2</sup>) en áreas que no poseen ninguna categoría de protección (fuera de ANP o TI).

A pesar de que en áreas fuera de ANP y TI la deforestación disminuyó en 15% en el último quinquenio con respecto al anterior, estas áreas concentran el mayor porcentaje de la deforestación total detectada (45%, 49% y 47% del total deforestado en cada respectivo quinquenio).

Áreas exclusivamente de TI y áreas fuera de TI y/o ANP presentaron un incremento de su deforestación en el segundo quinquenio con respecto al primero en +6 km<sup>2</sup> en TI y +64 km<sup>2</sup> en áreas fuera de TI y ANP, que luego se redujo en el último quinquenio con respecto al anterior en -41 km<sup>2</sup> y -83 km<sup>2</sup> respectivamente (Figura 9).

En áreas exclusivamente ANP la deforestación incrementó en +27 km<sup>2</sup> en el segundo quinquenio con respecto al primero y en +22 km<sup>2</sup> en el tercer quinquenio con respecto al segundo, pasando de representar el 9% de la deforestación detectada en la RAE entre 2000-2005 al 11% en el segundo quinquenio y a 15% en el último.

La deforestación en áreas de solapamiento representó el 13.67% de la deforestación del primer quinquenio, el 7.58% de la deforestación del segundo quinquenio y el 5.57% del último quinquenio. En estas áreas, la deforestación se redujo en -61 km<sup>2</sup> en el segundo quinquenio con respecto al primero y en -29 km<sup>2</sup> en el tercer quinquenio con respecto al segundo (Figura 9).

Los valores de deforestación en TI, ANP, en áreas de solapamiento y fuera de ANP y/o TI en km<sup>2</sup> y el porcentaje que representó de la deforestación total de cada quinquenio se resumen en la Tabla 10.

**TABLA 10**  
DEFORESTACIÓN EN ÁREAS DE SOLAPAMIENTO ENTRE TI Y ANP POR QUINQUENIO

	DEFORESTACIÓN (KM <sup>2</sup> )			TOTAL
	2000-2005	2005-2010	2010-2015	2000-2015
<b>TI</b>	338.24 (32.10%)	344.43 (31.61%)	303.06 (31.65%)	985.73 (32%)
<b>ANP</b>	95.39 (9.05%)	122.21 (11.22%)	144.03 (15.04%)	361.62 (12%)
<b>SOLAPAMIENTO ANP Y TI</b>	144.03 (13.67%)	82.55 (7.58%)	53.31 (5.57%)	279.90 (9%)
<b>FUERA DE TI Y ANP</b>	475.97 (45.17%)	540.39 (49.60%)	456.99 (47.73%)	1473.35 (48%)
<b>TOTAL</b>	1053.63	1089.58	957.40	3100.60

Deforestación por áreas de uso y posesión (Km<sup>2</sup>)

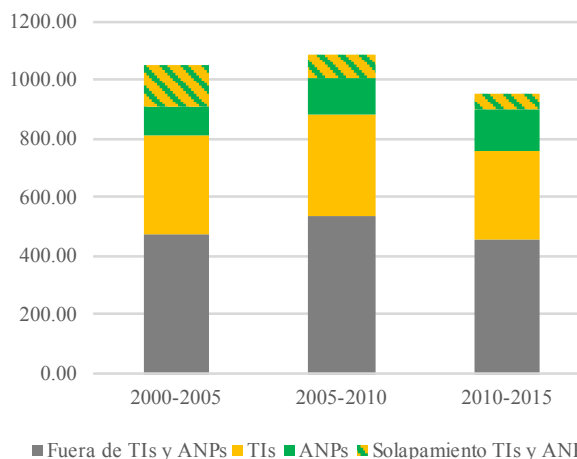


Figura 9: Deforestación (km<sup>2</sup>) por ANP, TI, áreas de solapamiento entre ANP y TI y áreas fuera de ANP y TI, para los quinquenios 2000-2005, 2005-2010 y 2010-2015.

#### E. ESTIMACIÓN DE PRECISIÓN DE LOS DATOS 2000-2010

La precisión general para el mapeo de bosque, no bosque, deforestación y agua fue de 0.81, empleando datos de referencia provenientes de Google Earth. A pesar de que empleamos datos de referencia de alta resolución, la combinación de imágenes satelitales junto con datos de campo sobre áreas más extensas probablemente proveería de mejores resultados de validación. La Tabla 11 presenta los resultados de la evaluación de precisión de los resultados clasificados.

**TABLA 11**  
ESTIMACIÓN DE PRECISIÓN DE LOS RESULTADOS

CLASE	DATOS DE REFERENCIA					PRECISIÓN DEL USUARIO
	BOSQUE	NO BOSQUE	AGUA	DEFORESTACIÓN	TOTAL	
Bosque	339	51	3	7	400	0.85
No Bosque	84	403	4	0	491	0.82
Agua	3	1	95	0	99	0.96
Deforestación	106	2	0	304	412	0.74
Total	532	457	102	311	1402	
Precisión del productor	0.64	0.88	0.93	0.98		
Precisión general (1141/1402) = 0.81						

#### IV. CONCLUSIONES

La RAE representa 1.6% de los 6,012,201 km<sup>2</sup> de ecosistemas boscosos que tiene la Cuenca Amazónica y que son mapeados por la RAISG. Sin embargo, la deforestación en la RAE en 2010-2015 representó 2% de la deforestación total en la cuenca amazónica. Este porcentaje es mayor al 1.37% que representó el quinquenio 2005-2010 y al 0.96% del quinquenio 2000-2005. Es decir que, si bien la cantidad total de deforestación que ocurre en la RAE no alcanza las extensiones de otros países, llama la atención que no está decreciendo a la misma velocidad que la deforestación para el mismo periodo en el resto de países de la cuenca (INPE-PRODES, 2017; Instituto del Bien Común, 2016; RAISG, 2016b)

Al 2015, Ecuador ha perdido 12.6% de sus bosques amazónicos originales (12,120 de 96,073 km<sup>2</sup>), lo cual le hace merecedor al segundo lugar (después de Brasil) en el ranking de países que han perdido la mayor porción (porcentaje) de sus bosques amazónicos originales. Ecuador perdió 3.6% de los bosques remanentes al 2000 entre 2000 y 2015; 1.1% de los bosques remanentes al 2010 se deforestaron entre 2010 y 2015.

La diferencia entre los tres periodos es pequeña y los valores de deforestación no presentan una clara tendencia: tras observar un incremento en el segundo quinquenio (2005-2010) con respecto al primero (2000-2005), se observó una reducción de 12% (o 132.18 km<sup>2</sup>) en los últimos cinco años (2010 al 2015) con respecto al quinquenio anterior.

Las áreas fuera de ANP y TI están perdiendo sus bosques en mayor velocidad que las demás áreas: 3.3% de los bosques remanentes al 2010 en el quinquenio 2010 - 2015.

A pesar de que la deforestación dentro de las ANP se ha reducido en cuanto a su extensión (km<sup>2</sup>) a lo largo de los tres quinquenios (entre 2005-2010 se redujo en -34 km<sup>2</sup> con respecto a 2000-2005, y en -7 km<sup>2</sup> en 2010-2015 con respecto al quinquenio anterior), esta no se redujo en la misma proporción o velocidad que en el resto de la región (i.e. fuera de ANP). Es decir, que si bien pasó de 239.42 km<sup>2</sup> deforestados entre 2000-2005 (o 22.72% de la deforestación de ese periodo) a 204.76 km<sup>2</sup> en 2005-2010 (18.79% de la deforestación de ese periodo), la extensión total del último quinquenio, aunque menor en extensión (197.34 km<sup>2</sup>) con respecto a periodos anteriores, representa un incremento en la proporción del total deforestado en ese quinquenio: 20.61% de la deforestación detectada entre 2010-2015 (Tabla 3). Esta tendencia difiere (es opuesta) a la observada en la región.

El análisis por áreas de solapamiento permitió ver que estas reducciones en extensión de la deforestación en ANP se dan en su totalidad en áreas de solapamiento con TI, las cuales marcan la tendencia general para las ANP, mientras que en áreas exclusivamente con categoría de ANP, la deforestación incrementó en los tres quinquenios.

Hay que hacer una salvedad con esta tendencia, puesto que el protocolo del análisis de deforestación de RAISG implica usar la capa de ANP más reciente y no se excluyen áreas que en periodos anteriores pueden no haber sido ANP, por lo tanto puede incluirse como deforestación dentro de ANP alguna extensión que al momento de ser deforestada no era parte de una ANP. Este estudio no se enfocó en analizar en qué medida, a partir de la creación de ANP, se detienen o revierten las tendencias de deforestación. Ese análisis debe reunir otras consideraciones ya que la creación y redefinición de límites de ANP son procesos dinámicos.

Independientemente de la tendencia de la RAE, la deforestación en TI presenta reducciones a lo largo de los tres quinquenios, tanto en extensión como en la proporción que esta deforestación representa del cambio total de toda la región. Esta disminución podría estar relacionada a la cultura de conservación de su patrimonio de las nacionalidades y pueblos indígenas amazónicos que resulta en un uso del territorio distinto al de los colonos, o como se ha identificado en otras partes, porque existe una relación entre la legalidad en la tenencia de tierras comunales y la reducción en las tasas de conversión de bosques (Blackman, Corral, Santos Lima, & Asner, 2017). La tendencia a la reducción de la deforestación dentro de TI se ha observado en la Amazonía brasilera donde a niveles moderados de presión los TI demostraron ser al menos tan eficaces para evitar deforestación como las áreas estrictamente protegidas y más eficaces que cualquier otro tipo de protección, a altos niveles de presión (Nolte, Agrawal, Silvius, & Soares-Filho, 2013). Un estudio en el norte de la RAE también encontró una fuerte relación entre una disminución de la deforestación en territorios indígenas que se superponen con ANP o con áreas del patrimonio forestal del Estado (Holland et al., 2014). En su estudio sobre patrones y factores de deforestación en Ecuador continental de 1990 a 2010, Sierra (2013) propone un conjunto de condiciones que explicarían la reducción en la tasa de deforestación que él también encontró, principalmente en la Amazonía norte. Entre ellas, mejoras en la accesibilidad a áreas urbanas y periurbanas, el incremento de los ingresos urbanos y rurales no agropecuarios y una caída en las tasas de natalidad en las poblaciones colonas e indígenas de la Amazonía, las que generan transformaciones importantes en el sector agrícola, influyendo también en los patrones y tasas de deforestación. En Perú se ha detectado la particularidad de que la deforestación dentro de territorios indígenas reconocidos oficialmente se ha venido reduciendo en el mismo periodo 2000-2015, mientras que para TI sin reconocimiento oficial prácticamente se duplicó en el último quinquenio con respecto al primero (Instituto del Bien Común, 2016).

Entre 2005-2010 la deforestación en TI se redujo en -55 km<sup>2</sup> con respecto a 2000-2005, y en -71 km<sup>2</sup> en 2010-2015 con respecto al quinquenio anterior. Los TI pasaron de 482 km<sup>2</sup> deforestados entre 2000-2005 (45% de la deforestación en la RAE para ese periodo), a 427 km<sup>2</sup> en 2005-2010 (39% de la deforestación de ese periodo) y a 356 km<sup>2</sup> (37% de la deforestación de ese periodo) en el último quinquenio (Tabla 6). Esta reducción se da principalmente (no en su totalidad como en el caso de ANP) en áreas de solapamiento de TI y ANP.

Si bien se podría pensar que la extensión de la deforestación en TI es proporcional a la extensión de los territorios de cada nacionalidad, esto no ocurre. La primera y tercera nacionalidad con mayores extensiones de territorios (Kichwa amazónica y Shuar con territorios cuyas extensiones cubren 22,609 y 11,200 km<sup>2</sup> respectivamente) concentran el mayor porcentaje (83%) de la deforestación ocurrida en TI entre 2000 y 2015 (45% en territorios Kichwa y 38% en territorios Shuar). Otras nacionalidades con similares extensiones presentan tasas de deforestación muy bajas, como es el caso de los Waorani donde apenas ocurre 2.6% de la deforestación de TI entre 2000-2015 a pesar de tener el segundo territorio más extenso de las nacionalidades amazónicas (Figura 10, Tabla 8). Para siguientes análisis pensamos ponderar estos resultados en relación al tamaño de la población que habita estos territorios.

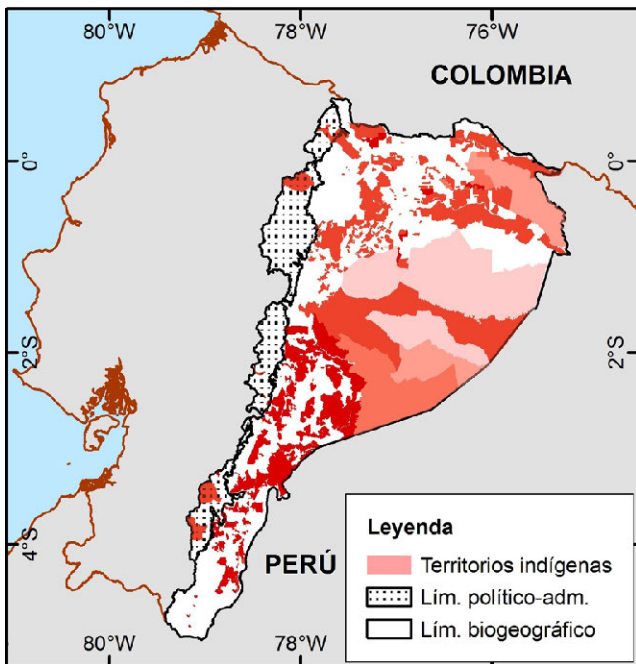


Figura 10: Mapa de la extensión de deforestación 2010-2015 por TI en relación a la extensión total de su territorio (elaboración propia). La intensidad de la gama de rojo representa una mayor magnitud de la deforestación por unidad de área (km<sup>2</sup>).

### TENDENCIAS

Encontramos tres tendencias diferentes en los valores de deforestación: una consistente con la tendencia regional (a modo de campana) con un incremento inicial y un decrecimiento posterior (este es el caso de TI y áreas fuera de TI y ANP), una tendencia a que la deforestación decrezca (este es el caso de áreas de solapamiento entre TI y ANP), y áreas donde la deforestación incrementa (este es el caso de las ANP).

Como puede esperarse, la deforestación se concentra en áreas fuera de ANP y TI (más del 45% de deforestación de cada quinquenio). Alrededor de un tercio (32%) de la deforestación de cada quinquenio se detectó en las áreas de TI que no tienen solapamiento con ANP. Juntas, estas áreas cuyos regímenes de posesión de la tierra son diferentes a tierras públicas, suman más de las tres cuartas partes de la deforestación detectada en cada quinquenio (77%, 81% y 79% en cada respectivo quinquenio).

En la RAE, es posible ver que las categorías de protección implican diferencias en las tasas de deforestación. A pesar de que existe una reducción de la deforestación de -15% en áreas que no corresponden ni a TI ni a ANP, existe una mayor cantidad de deforestación por unidad de área. Dentro de las categorías de protección, las áreas que mayor eficiencia demuestran en cuanto a la reducción de la velocidad de deforestación son

las áreas de solapamiento o las áreas de TI, donde la deforestación se redujo en 35% en el último quinquenio con respecto al anterior.

Globalmente, tanto TI como ANP presentan valores decrecientes de deforestación. Sin embargo, la consideración de áreas de solapamiento entre ANP y TI muestra que las disminuciones corresponden principalmente a reducciones en áreas de solapamiento entre ANP y TI.

Si analizamos globalmente (sin distinguir áreas de solapamiento) podríamos concluir que en los TI la deforestación disminuyó en 16% y en las ANP se redujo en 3%. Sin embargo, la consideración de las áreas de solapamiento en este análisis muestra que estas disminuciones corresponden principalmente a reducciones en áreas de solapamiento entre ANP y TI (donde la deforestación disminuyó en 35%). En áreas exclusivamente ANP (sin solapamiento) la deforestación incrementó en 18% por lo que representan las regiones mayormente afectadas por un incremento de la deforestación.

### METODOLOGÍA

La metodología aquí presentada representa una alternativa para el monitoreo de bosques y pérdida de los mismos. El uso del NDFI provee de mayor sensibilidad para detectar aperturas en los doseles del bosque.

El acceso a imágenes libres de cobertura de nube es crítico para el monitoreo de deforestación y quizá uno de los mayores retos enfrentados en estos 15 años de monitoreo. Sin embargo, esta es un área donde hemos experimentado uno de los más destacables avances al poder componer, a partir de la migración al Google Earth Engine, para el análisis del año 2015, una imagen mosaico de píxeles, aprovechando así la totalidad de datos disponibles para un periodo de estudio y potencializando nuestra capacidad de monitoreo de los bosques.

El uso del NDFI en la Amazonía se había limitado a los bosques brasileros, cuyas características varían de las de los bosques andino-amazónicos, donde la metodología debió adaptarse para responder a los requerimientos específicos de estos territorios debido a su topografía, nubosidad y heterogeneidad. Este fue un reto al que la RAISG debió enfrentarse, pues si bien la extensión del territorio de los países que comparten la cuenca es menor comparada con la de Brasil, la complejidad de sus terrenos dificulta el trabajo de detección de deforestación. A pesar de ello, este trabajo en Red ha demostrado que es posible generar información georreferenciada de la pérdida de los bosques amazónicos con una metodología estandarizada y con uniformidad en los periodos de análisis.

Estamos trabajando en la comparación de nuestras tasas de deforestación y enfoque metodológico con aquellos de otras fuentes, principalmente del organismo gubernamental (Ministerio del Ambiente).

**AGRADECIMIENTOS**

Los autores agradecemos a todas las instituciones de la RAISG que hicieron posible este trabajo, de manera especial a quienes conforman o han aportado a la RAISG desde EcoCiencia: Víctor López, Janette Ulloa, Fabián Santos, Juan Calles, Karla Beltrán, Fernando Espíndola, Adriana Cárdenas, Ana Puyol, Sylvania Villacís. Extendemos nuestro agradecimiento a Sandra Ríos (Instituto del Bien Común, Perú) por sus valiosas observaciones para este artículo, a Imazon (Brasil) por el apoyo en el desarrollo de ImgTools y a los respectivos equipos técnicos de cada una de las organizaciones que conforman la RAISG por su trabajo para adaptar esta metodología al contexto andino-amazónico.

**REFERENCIAS**

- Blackman, A., Corral, L., Santos Lima, E., & Asner, G. P. (2017). Titling indigenous communities protects forests in the Peruvian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(16), 4123–4128. <https://doi.org/10.1073/pnas.1603290114>
- Bremner, J., & Lu, F. (2006). Common Property among Indigenous Peoples of the Ecuadorian Amazon. *Conservation and Society*, 4(4), 499–521. Recuperado desde [http://www.conservationandsociety.org/temp/Conservat-Soc44499-5862783\\_161707.pdf](http://www.conservationandsociety.org/temp/Conservat-Soc44499-5862783_161707.pdf)
- Carlotto, M. J. (1999). Reducing the effects of space-varying, wavelength-dependent scattering in multispectral imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 20(17), 3333–3344. <https://doi.org/10.1080/014311699211363>
- Cochrane, M. A., & Souza Jr., C. M. (1998). Linear mixture model classification of burned forests in the Eastern Amazon. *International Journal of Remote Sensing*, 19(17), 3433–3440. <https://doi.org/10.1080/014311698214109>
- Convention on Biological Diversity. (2010). Strategic Plan for biodiversity 2011-2020. Further information related to the technical rationale for the Aichi Biodiversity Targets, including potential indicators and milestones. Nagoya - Japan. Recuperado desde <https://www.cbd.int/doc/meetings/cop/cop-10/information/cop-10-inf-12-rev1-en.pdf>
- Cuenca, P., Arriagada, R., & Echeverría, C. (2016). How much deforestation do protected areas avoid in tropical Andean landscapes? *Environmental Science & Policy*, 56, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.10.014>
- Davis, S., & Wali, A. (1994). Indigenous Land Tenure and Tropical Forest Management in Latin America. *Ambio*, 23(8), 485–490. Recuperado desde <http://www.jstor.org/stable/4314265>
- Ding, H., Veit, P. G., Blackman, A., Gray, E., Reytar, K., Altamirano, J. C., & Hodgdon, B. (2016). Climate Benefits, Tenure Costs - The Economic Case For Securing Indigenous Land Rights in the Amazon. Recuperado desde [http://www.wri.org/sites/default/files/Climate\\_Benefits\\_Tenure\\_Costs.pdf](http://www.wri.org/sites/default/files/Climate_Benefits_Tenure_Costs.pdf)
- Foody, G. M. (1999). The continuum of classification fuzziness in thematic mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 65(4), 443–451. Recuperado desde <https://pdfs.semanticscholar.org/4480/03be30073f1469d-8f848997b01878945540c.pdf>
- Fundación EcoCiencia. (2015). Mapa de Territorios Indígenas de la Región Amazónica Ecuatoriana. Quito - Ecuador.
- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., ... Townshend, J. R. G. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850–853. <https://doi.org/10.1126/science.1244693>
- Holland, M. B., de Koning, F., Morales, M., Naughton-Treves, L., Robinson, B. E., & Suárez, L. (2014). Complex Tenure and Deforestation: Implications for Conservation Incentives in the Ecuadorian Amazon. *World Development*, 55, 21–36. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2013.01.012>
- INPE-PRODES. (2017). Taxas anuais do desmatamento - 1988 até 2016. Recuperado desde [http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes\\_1988\\_2016n.htm](http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2016n.htm)
- Instituto del Bien Común. (2016). Amazonía Peruana: Deforestación 2001-2015. Lima - Perú.
- Jarvis, A., Reuter, H. I., Nelson, A., & Guevara, E. (2008). Hole-filled SRTM for the globe Version 4, available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database. Recuperado desde <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Kaphengst, T., Davis, M., Gerstetter, C., Katharina Klaas, McGlade, K., & Naumann, S. (2014). Quality of Life, Wellbeing and Biodiversity | The role of biodiversity in future development Timo. Berlin. Recuperado desde <http://ecologic.eu/11518>
- López-Acevedo, V., Aragón-Osejo, J., & Ulloa, J. (2015). Cartografía histórica de las Áreas Naturales Protegidas y los Territorios Indígenas de la Amazonía Ecuatoriana. Quito - Ecuador.
- MAE-MAGAP. (2015). Protocolo metodológico para la elaboración del Mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador continental 2013 - 2014, escala 1:100.000, 1–49.
- McAlpine, K. G., & Wotton, D. M. (2009). Conservation and the delivery of ecosystem services. *Science for Conservation*, (295), 5–81.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Washington, DC. Recuperado desde <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2013a). Mapa de Ecosistemas del Ecuador Continental. Quito - Ecuador.
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2013b). Sistema de Clasificación de los Ecosistemas del Ecuador Continental. Subsecretaría de Patrimonio Natural. Quito - Ecuador. Recuperado desde <http://app.sni.gov.ec/sni-link/sni/PDOT/NIVEL NACIONAL/MAE/ECOSISTEMAS/DOCUMENTOS/Sistema.pdf>
- Ministerio del Ambiente del Ecuador. (2015). Mapa del Sistema Nacional de Áreas Protegidas. Quito - Ecuador.
- Nagendra, H. (2007). Drivers of reforestation in human-dominated forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104(39), 15218–23. <https://doi.org/10.1073/pnas.0702319104>
- Nepstad, D., Schwartzman, S., Bamberger, B., Santilli, M., Ray, D., Schlesinger, P., ... Rolla, A. (2006). Inhibition of Amazon deforestation and fire by parks and indigenous lands. *Conservation Biology*, 20(1), 65–73. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2006.00351.x>

- Nolte, C., Agrawal, A., Silvius, K. M., & Soares-Filho, B. S. (2013). Governance regime and location influence avoided deforestation success of protected areas in the Brazilian Amazon. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(13), 4956–4961. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214786110>
- OEA. (2010). *Indigenous and Tribal Peoples' rights over their ancestral lands and natural resources - Norms and Jurisprudence of the Inter American Human Rights System*. Washington, DC. Recuperado desde <http://www.oas.org/en/iachr/indigenous/docs/pdf/ancestrallands.pdf>
- Powell, R. L., Matzke, N., de Souza, C., Clark, M., Numata, I., Hess, L. L., ... Roberts, D. A. (2004). Sources of error in accuracy assessment of thematic land-cover maps in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing of Environment*, 90(2), 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.12.007>
- Puyravaud, J. P. (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management*, 177(1–3), 593–596. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(02\)00335-3](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(02)00335-3)
- RAISG. (2016a). *Cartografía Histórica de Áreas Naturales Protegidas y Territorios Indígenas en la Amazonía*.
- RAISG. (2016b). *Mapa Amazonía 2016 - Áreas Protegidas y Territorios Indígenas (deforestación 2000-2015)*. Recuperado desde [https://www.amazoniasocioambiental.org/wp-content/uploads/2017/04/AMAZONIA2016\\_espanol\\_18maio.pdf](https://www.amazoniasocioambiental.org/wp-content/uploads/2017/04/AMAZONIA2016_espanol_18maio.pdf)
- RAISG. (2017). *Territorios Indígenas [Dataset]*. Recuperado desde <https://www.amazoniasocioambiental.org/mapas/>
- Roldán, R. (2004). *Models for Recognizing Indigenous Land Rights in Latin America*. Washington, DC. Recuperado desde <https://pdfs.semanticscholar.org/c517/c40b772aaa59864e4531416a6888abf62cbd.pdf>
- Salati, E., & Vose, P. B. (1984). Amazon basin: a system in equilibrium. *Science (New York, N.Y.)*, 225(4658), 129–38. <https://doi.org/10.1126/science.225.4658.129>
- Sierra, R. (2013). *Patrones y factores de deforestación en el Ecuador continental, 1990-2010. Y un acercamiento los próximos 10 años*. Quito - Ecuador. Recuperado desde [http://www.forest-trends.org/documents/files/doc\\_3396.pdf](http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_3396.pdf)
- Small, C. (2004). The Landsat ETM+ spectral mixing space. *Remote Sensing of Environment*, 93(1–2), 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.06.007>
- Souza Jr., C. M., Roberts, D. A., & Cochrane, M. A. (2005). Combining spectral and spatial information to map canopy damage from selective logging and forest fires. *Remote Sensing of Environment*, 98(2–3), 329–343. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.07.013>
- Souza Jr., C. M., Roberts, D. A., & Monteiro, A. L. (2005). Multitemporal analysis of degraded forests in the southern Brazilian Amazon. *Earth Interactions*, 9(19), 1–25. <https://doi.org/10.1175/EI132.1>
- Souza Jr., C. M., Siqueira, J., Sales, M., Fonseca, A., Ribeiro, J., Numata, I., ... Barlow, J. (2013). Ten-Year Landsat Classification of Deforestation and Forest Degradation in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing*, 5(11), 5493–5513. <https://doi.org/10.3390/rs5115493>
- Souza Jr., C. M., & Siqueira, J. V. N. (2013). *ImgTools: a software for optical remotely sensed data analysis*. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1571–1578. Recuperado desde <http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p1235.pdf>
- Sunderlin, W. D., Larson, A. M., & Cronkleton, P. (2009). Forest tenure rights and REDD+: From inertia to policy solutions. In A. Angelsen, M. Brockhaus, M. Kanninen, E. Sills, W. D. Sunderlin, & S. Wertz-Kanounnikoff (Eds.), *Realising REDD+: National strategy and policy options* (pp. 139–124). Bogor - Indonesia: Center for International Forestry Research. Recuperado desde [http://www.cifor.org/publications/pdf\\_files/books/bangelsen090211.pdf](http://www.cifor.org/publications/pdf_files/books/bangelsen090211.pdf)
- Walker, W., Baccini, A., Schwartzman, S., Ríos, S., Oliveira-Miranda, M. A., Augusto, C., ... Campos, E. V. (2014). Forest carbon in Amazonia: the unrecognized contribution of indigenous territories and protected natural areas. *Carbon Management*, 5(5–6), 479–485. <https://doi.org/10.1080/17583004.2014.990680>

# Contaminación por ruido en centros urbanos

Martínez Julia<sup>1</sup>, Delgado Omar<sup>2</sup>

1 Instituto de Estudios de Régimen  
Seccional del Ecuador (IERSE)/Uni-  
versidad del Azuay  
Cuenca/Azuay/Ecuador  
jumartinez@uazuay.edu.ec

2 Instituto de Estudios de Régimen  
Seccional del Ecuador (IERSE)/Uni-  
versidad del Azuay  
Cuenca/Azuay/Ecuador  
odelgado@uazuay.edu.ec

## RESUMEN

Contar con parámetros de calidad ambiental en la ciudad de Cuenca, ha sido el objetivo de la Universidad del Azuay; es así que desde al año 2009, realiza monitoreos periódicos de las emisiones sonoras, en sitios pre establecidos. Se inició con 30 puntos de monitoreo hasta el año 2015, y para el presente trabajo se incrementó un punto adicional ubicado en el redondel de la Universidad del Azuay, debido a la importancia de contar con información sonora producida por la dinámica de este centro de estudios. Se utilizó un sonómetro para el levantamiento de datos; en cada sitio de monitoreo se levantó información en seis horarios representativos: 7h00, 10h00, 13h00, 15h00, 18h00 y 21h00 en un período de 15 minutos por cada horario. Los datos obtenidos fueron evaluados sobre la base de comparación con la normativa ambiental nacional vigente (Anexo 5 del Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente (TULSMA - 2015). Para la modelación del ruido y su representación en mapas se utilizaron: el método de interpolación del Inverso de la Distancia IDW y el software Datakustik "Cadna A", que estima las emisiones sonoras sobre la base de parámetros viales (Tráfico promedio diario, ancho de vía, tipo de calzada, etc.). La representación obtenida con el citado software, representa de manera directa el comportamiento del ruido en las vías, constituyendo una representación ajustada a la dinámica de la población. Los resultados reflejan una disminución en las emisiones en el último año, en comparación con años anteriores, sin embargo, las emisiones están sobre las normas ambientales, observando que las campañas de sensibilización son necesarias para mantener en la ciudadanía atenta y comprometida con la disminución de las emisiones.

Palabras clave: **Ruido, evaluación sonora, TULSMA, uso del suelo.**

## ABSTRACT

*Having environmental quality parameters in the city of Cuenca has been the objective of the University of Azuay; it is so that from 2009, it performs periodic monitoring of sound emissions, in pre-established sites. It began with 30 monitoring points until 2015, and for the present work, an additional point located in the roundabout of the University of Azuay due to the importance of having sound information produced by the dynamics of this center of studies. A sound level meter is used for data collection; at each monitoring site, in-*

formation was collected at six representative times: 7:00 a.m., 10:00 a.m., 1:00 p.m., 3:00 p.m., 6:00 p.m. and 9:00 p.m. in a period of 15 minutes for each schedule. The data obtained was evaluated based on comparison with the current national environmental regulations (Annex 5 of the Unified Text of Secondary Legislation of the Ministry of the Environment (TULSMA - 2015 in Spanish). For the modeling of the noise and its representation in maps: the interpolation method of the Inverse Distance IDW and the software Datakustik "Cadna A" was used. Which estimates sound emissions based on road parameters (average daily traffic, track gauge, road type, etc.). The representation obtained with this software, directly represents the behavior of the noise in the tracks, constituting a representation adjusted to the dynamics of the population. The results reflect a decrease in emissions in the last year, compared to previous years; however, emissions are above environmental standards, noting that awareness campaigns are necessary to keep citizens attentive and committed to decreasing the emissions.

**Keywords:** *Noise, sound evaluation, TULSMA, land use.*

## I. INTRODUCCIÓN

El monitoreo de ruido no es una actividad habitual que sea impulsada desde los organismos seccionales del Ecuador, pocas son las ciudades en donde se cuenta con un monitoreo de ruido: Quito, Guayaquil, Cuenca, el cual en muchos casos es inconsistente (BID, 2014) debido a su discontinuidad, en tanto que las restantes ciudades del Ecuador, carecen de datos relacionados con las emisiones de ruido, lo que ha impedido establecer las principales fuentes de emisión, así como el grado de afectación; pese a que en la norma nacional TULSMA (2015) exige la elaboración de mapas de ruido en todas aquellas ciudades que cuenten con una población superior a los 250.000 habitantes.

Esfuerzos permanentes se han emprendido en la ciudad de Cuenca, como son la suscripción de convenios de cooperación interinstitucional (2012, 2014 y 2016), entre la Universidad del Azuay y el Gobierno Autónomo Descentralizado municipal de Cuenca (GAD), encaminados a monitorear el ruido y así contar con una base de datos que permita conocer el comportamiento sonoro en la ciudad, sus causas y sus consecuencias, a sabiendas que la contaminación sonora trae repercusiones a la salud y bienestar ciudadano.

Una exposición constante y prolongada a niveles excesivos de sonido puede inducir lentamente, en algunos años, a la pérdida auditiva permanente, acumulativa e irreversible (Burneo, C. A. 2007), adicionalmente, genera impedimentos de desempeño como interferencia en la comunicación, cansancio, dificultad para dormir, reducción de las capacidades de atención, motivación, memoria, lectura y solución de tareas cognitivas, entre otras (OMS, 1999).

La contaminación acústica se ha constituido en una problemática creciente que se expresa mayormente en los sistemas urbanos y cuya causa principal recae en el transporte vehicular (FHWA-Federal Highway Administration. 2004).

El cumplimiento de las normas ambientales, las consecuencias en la salud y el bienestar ciudadano hacen que la Universidad del Azuay y el GAD municipal de Cuenca actualicen su base de datos de ruido al 2016, evalúen el comportamiento sonoro, elaboren mapas de ruido y establezcan las tendencias de las emisiones de ruido en la ciudad de Cuenca, así como también establezcan medidas de mitigación ambiental.

## II. MÉTODO

Se validó la ubicación de los 30 puntos de muestreo que fueron considerados en el año 2012 (Martínez J., Delgado O., 2015), se adicionó 1 punto, ubicado en la Universidad del Azuay. Las

mediciones se realizaron con un sonómetro Modelo SOUND QUESTPRO SP-DL- 2-1/3, en seis horarios (7h00, 10h00, 13h00, 15h00, 18h00 y 21h00) (GADMCC, 2007), por períodos de 15 minutos en cada horario, luego se sistematizó la información y se evaluó del comportamiento sonoro en cuatro períodos: 2012, 2014, 2015 y 2016, tomando como base el Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente - TULSMA (2015).

Para la generación del mapa de ruido, se empleó la técnica de interpolación determinista y exacta: media ponderada por el inverso de la distancia - IDW; y adicionalmente se trabajó en la modelación del ruido en las vías empleando información de densidad de tráfico a través del programa informático CadnaA.

El método IDW se apoya en el concepto de continuidad espacial, con valores más parecidos para posiciones cercanas que se van diferenciando conforme se incrementa la distancia (García González, J. A., & Cebrián Abellán, F. (2006). El método CadnaA utiliza el software de modelización, cálculo y gestión del ruido ambiental, sobre la base del análisis de factores relacionados con el tráfico.

En el presente trabajo los factores que formaron parte del cálculo fueron:

- Intensidad Media Diaria (IMD) de las vías de la ciudad de Cuenca, actualizado al 2015, proporcionado por el Gobierno Autónomo Descentralizado municipal de Cuenca.
- Material de la calzada
- Tipo de vía
- Número de carriles
- Ancho de vía
- Velocidad de circulación
- Tipo de flujo de circulación
- Altura absoluta y relativa de las calzadas
- Información sobre los predios y manzanas de la ciudad, la cual sirvió para delimitar el área de cálculo.

Con la información descrita se procede a configurar el software CadnaA y a elaborar el modelamiento del ruido en el área urbana de la ciudad de Cuenca.

## III. RESULTADOS

La evaluación de las emisiones sonoras se presenta en la Tabla 1, su detalle es el siguiente:

Durante el período 2014 se realizan 180 muestreos, el 37,7% de las mediciones presentan un incremento y el 62,3% disminuye. Sobre los parámetros establecidos en el TULSMA (2015) están el 100% de las mediciones.



**TABLA I**  
Comparación de emisiones sonoras (2012 - 2014 - 2015 - 2016)

N°	Punto Medido (sector)	Año 2016 (Lavg)						Año 2015 (Lavg)						Año 2014 (Lavg)						Año 2012 (Lavg)					
		7h00	10h00	13h00	15h00	18h00	21h00	7h00	10h00	13h00	15h00	18h00	21h00	7h00	10h00	13h00	15h00	18h00	21h00	7h00	10h00	13h00	15h00	18h00	21h00
R_01	Estadio	65,7	67,2	64,0	65,0	60,8	63,6	70,3	75,5	72,8	71,8	72,6	66,9	70,4	69,6	68,1	69,8	68,4	66,6	72,5	73,2	73,2	72,6	72,7	67,2
R_02	Garapal	70,8	70,2	73,5	69,9	77,7	66,0	77,6	77,7	73	72,5	74,2	68,5	72,7	75,6	73,6	72,9	72,9	69	72,7	71,5	71,1	71,5	73	67,9
R_03	Aeropuerto Mariscal	57,1	60,1	61,9	65,2	69,1	60,1	69,3	66,9	68,2	65,1	65,8	62,3	70,8	69,2	73,9	69,2	70,7	68,1	69	71,7	74,1	70,5	74,5	69,6
R_04	Tres Puentes	79,4	66,4	62,7	64,6	64,2	65,2	71,4	70,8	72	72	71,3	68,4	67,9	68	66,8	67,5	67,6	64,3	74,3	74,8	76,5	76,3	68	70,7
R_05	Romiglo Crespo	69,4	69,5	70,2	70,9	69,5	62,8	74,4	73,5	73,6	72,8	73,8	72,9	72,8	73,1	73,5	72,2	70,7	72,9	71,9	72,2	72,4	72,3	76	70,6
R_06	Hospital Regional	67,4	66,2	65,8	69,0	66,3	66,1	74,3	73,7	71,2	70,7	72	66,3	69,8	65,3	67,9	64,9	65,2	63,7	66	66,8	66,5	67,4	73,2	64,2
R_07	Challuabamba	71,7	70,0	71,0	71,2	71,0	71,1	76,4	74,8	74,9	73,9	77	72,9	72,6	72,8	71,1	71	72,6	72,4	77,4	72,6	75,3	75,1	72,9	70,6
R_08	Lagunas de oxigenación	68,8	68,1	67,6	62,6	68,4	65,7	74,8	71,3	70,9	69,4	70,3	68	64,3	65,1	65,1	66,2	66,6	57	80,7	77,1	76,5	76,8	76,5	71,9
R_09	Monumento a la Familia	68,4	69,4	72,5	70,1	67,3	63,1	72,8	71,8	72,3	72,9	72,1	69,8	62,3	63,6	63,6	65,5	64,2	61,2	72,5	75,3	71	70,2	72,3	60,3
R_10	Parque Industrial	70,3	70,9	70,0	69,1	73,9	68,1	75,8	73,7	73,5	73,3	74,6	70,8	75,6	70,5	76	73	72,6	71,3	73,4	75,5	73,2	77	72,9	71,7
R_11	Camal	66,8	63,0	68,0	65,7	64,3	61,1	71,3	70,2	70,6	70,4	70,4	66,9	70,3	66,7	67,4	69,8	67,4	63,3	53,3	56,7	69,9	67,1	61,8	62,8
R_12	Camino a Ochoa León	60,1	53,9	61,3	65,2	70,9	47,9	67	76,5	62,2	67,1	63,1	56,2	65,2	62,8	69	62,2	63,3	63,5	36,6	55,6	45,9	57,1	46,8	43,7
R_13	La Libertad	56,7	65,6	62,9	70,8	64,1	60,5	64,6	60,9	59,8	63,7	64,3	56,5	53,8	59,9	61,7	56,7	58,4	55,3	65,4	48,7	52	55,7	52,3	48
R_14	Los Cerezos Alto	65,4	63,4	65,5	61,5	63,3	62,3	65,3	68	71,9	72,2	69,6	69,1	68,6	66,7	70,5	70	67,9	62,4	70,2	62,3	70,8	76,3	72,5	64
R_15	Camino al Tejar	63,6	61,5	61,0	61,6	68,4	55,7	73	75,3	74,8	71,6	72,9	71,7	68	66,4	68	68,4	66,9	65,8	70,5	74,3	70,2	73,1	70,2	64,3
R_16	Via a Siminay (Miraflores)	66,3	62,9	67,5	56,8	66,5	62,6	68,8	65,6	67,1	68	72,1	62,8	70,6	68,2	68,7	67,6	68,8	68,2	74,1	68,8	62,9	63,6	65,6	67,4
R_17	El Cebollar	70,9	67,0	67,0	66,9	66,9	66,9	73,9	74,9	73,5	73,5	72,7	70,4	70,5	66,5	71	69	68,8	68,7	69,1	72,2	76,2	72,5	73,6	55,5
R_18	Hospital del IESS	72,5	68,2	72,2	70,2	64,0	69,2	77,7	75,2	73,9	76,5	77	73,4	70,5	70,6	67,2	71,5	68,9	66,8	74	71,9	77,9	72,7	72,2	74,8
R_19	Redondel Paseo de los Cañaris	68,5	68,4	68,8	67,7	67,8	65,2	75,5	73,3	73,7	72,9	76,4	72,1	69,6	67,8	70,6	70,1	69,8	67,1	74,3	73,9	74,6	73,5	76,3	74,7
R_20	Redondel del Otorongo	73,8	71,5	74,6	71,6	69,9	67,5	74,5	73,7	74,6	73,9	74,7	70,6	74,7	73,8	74	74,4	79,4	68,1	78,2	75,2	75,3	73,1	77,3	77,3
R_21	Feria Libre	66,3	72,7	73,4	69,8	67,8	64,5	74,4	75	74,5	75,4	73,5	72,9	62,4	63,2	61,3	62,6	63,5	64,5	74,6	73,1	72,3	72,9	71,4	71,4
R_22	Isabel La Católica	56,7	51,9	57,2	55,8	69,7	48,4	62,8	59,5	61,5	65,7	66,1	56,4	64,2	60	61,4	60,9	60	58,3	63,9	60,2	60,8	60,6	59,7	59,2
R_23	Av. de las Américas y Don Bosco	70,1	69,4	71,6	67,8	63,9	65,5	75	73,9	72,9	73,8	74,2	71,1	74,6	74,8	72,1	72,1	73,5	71,5	74,6	76,9	74,3	78	77,2	74,2
R_24	Control Sur	73,0	69,5	65,5	69,1	69,4	68,6	75,3	75,4	74,9	74,4	83,4	73	72,2	74	71,6	76,6	74,5	70,1	77	74,6	76,9	76,1	78,7	73,9
R_25	Gran Colombia	69,5	66,5	71,5	66,6	68,7	62,9	73,6	74,5	72,4	78,7	72,5	71,4	73,5	72,2	72,1	71	74,5	69,8	74,1	69,8	72,2	68,4	66,3	66,6
R_26	Cristo Rey	70,2	68,7	74,3	67,8	70,0	67,3	73,9	75,1	73,7	72,7	72,1	71,5	70,5	71,2	69,7	68,4	67,4	67,3	67,4	67,3	67,4	61	65,3	56,5
R_27	Chola Cuenca	66,3	66,2	66,9	73,9	66,3	66,7	72,8	72,3	73,8	73,2	76,8	70,4	66,8	67,3	67,6	68,8	68,5	69	73	76,5	74	74,3	71,4	67,6
R_28	Via Bnos	57,5	48,7	71,0	61,5	69,9	60,6	62,7	72,5	54,7	59,9	52,6	56,6	54,5	55	57	62,2	53,3	49,2	63,8	61	57,6	66,9	55,9	48,1
R_29	Bajada Centenario	71,9	70,4	73,4	75,7	70,9	65,6	76	74,8	75	73,9	75,1	70	76,2	73,1	75,5	74,6	74,4	71,2	75,2	74,2	74,4	73,5	74,3	66,1
R_30	Totoracocho	59,2	65,7	64,3	58,3	62,3	62,1	68,8	68,3	70,2	67	68,3	66,1	66,1	65,7	65,6	64,8	70,3	63,9	65,6	65,6	64,1	67,9	66,8	64

En el período 2014 - 2015, se incrementa la emisión sonora en el 77,8 de las mediciones, y el 100% de las mismas están sobre los parámetros del TULSMA (2015).

En el período 2015 - 2016, se produce una disminución de las emisiones en el 88,33 % de los puntos muestreados, y el 97% de los muestreos están sobre los parámetros del TULSMA (2015).

**REPRESENTACIÓN GRÁFICA**

Se elaboró un mapa de ruido de la ciudad por cada horario de muestreo, a continuación se presenta el mapa en el horario de mayor presencia de emisiones (10h00):

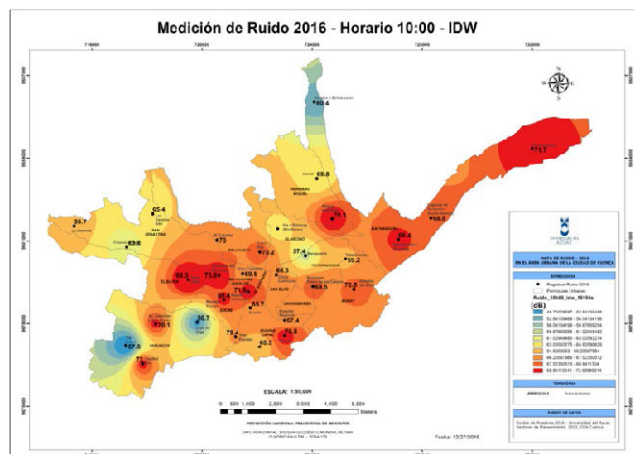


Figura. 1. Mapa de ruido de la ciudad de Cuenca (10h00) método IDW

Las zonas marcadas de color rojo presentan emisiones sonoras de hasta 72 dB y disminuyen en otras zonas hasta 48 dB, marcadas de color azul. Según la OMS, los valores corresponden a emisiones derivadas de la circulación vehicular.

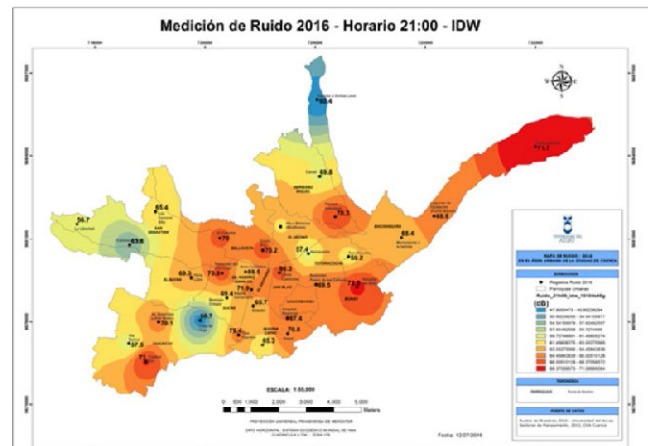


Figura N° 2.- Mapa de ruido de la ciudad de Cuenca (21h00) método IDW

Con una escala de valoración que va desde los 72 dB a los 48 dB, las zonas en donde se manifiestan las más altas emisiones son: Challuabamba, Hospital del Instituto Ecuatoriano de Seguridad Social (IESS) y el sector del Control sur.

Para la generación del mapa de ruido con el Cadna A, se utilizó los datos de tráfico y características viales correspondientes al año 2015, y obtuvo una representación para el día y otra para la noche. Los rangos de emisiones están entre 0 dB y 85dB, que corresponden a lo establecido por la OMS, ver Figuras 3 y 4.

Las emisiones sonoras en la ciudad se concentran en las vías y disminuye al centro de los manzanos.

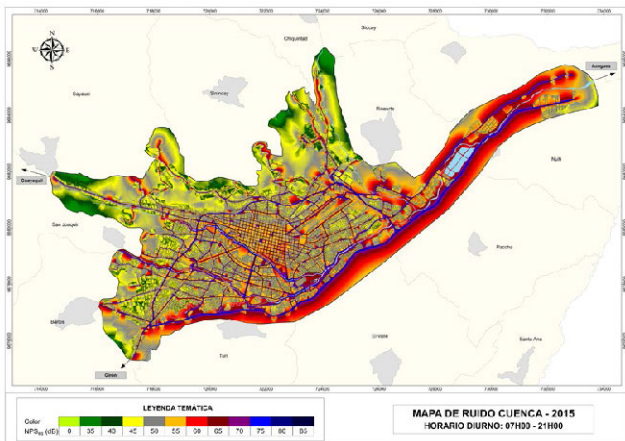


Figura N° 3.- Mapa de ruido de la ciudad de Cuenca - Método Cadna A - día

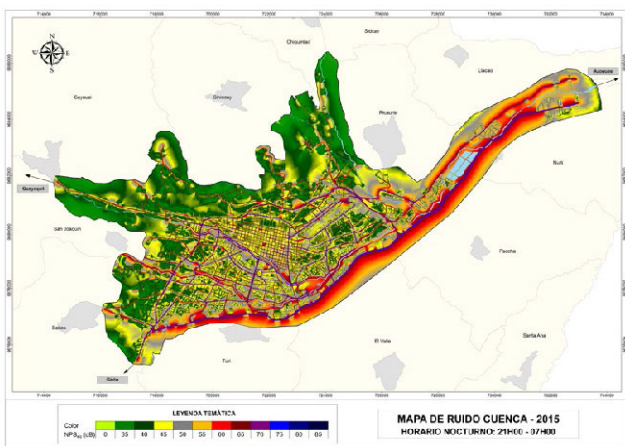


Figura N° 4.- Mapa de ruido de la ciudad de Cuenca - Método CadnaA - noche

#### IV. CONCLUSIONES

Durante el año 2016 las emisiones sonoras han disminuido con relación al año 2015 (Martínez J., Delgado O. 2015). en el 88,33% de los puntos de muestreo.

Si bien las emisiones disminuyen, sin embargo, están sobre el TULSMA - 2015: Zona de equipamientos sociales (EQ1) el 97%, residencial (R1) el 97%, comercial 98% y en la industrial el 22%.

Para la generación de los mapas de ruido se utilizó el método de interpolación IDW que toma en cuenta los 31 sitios de muestreo en diferentes horarios y el programa informático Cadna A, que representa las emisiones de ruido en la red vial, lo que se evidencia es que la representación de las emisiones con el software Cadna A, se asemejan más a la realidad, porque las mayores emisiones se presentan en las vías, y en el interior de los manzanos disminuye, en virtud de que las infraestructura construida, sirve como pantalla antiruido.

El valor de las emisiones que se obtuvo está en el orden de los 70 dB, el cual está dentro de lo recomendado por la OMS para ruido por tráfico vehicular.

Las emisiones del día son mayores a los de la noche, lo que refleja la dependencia del ruido al movimiento vehicular, el cual disminuye en la noche, lo que se refleja en las figuras 3 y 4.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se realiza con la cooperación del equipo técnico de la Comisión de Gestión Ambiental del Gobierno Autónomo Descentralizado Municipal de Cuenca y el equipo técnico del Instituto de Estudios del Régimen Seccional del Ecuador.

#### REFERENCIAS

BID. (2014) Cuenca ciudad sostenible. Quito: Banco Interamericano de Desarrollo & Gobierno Autónomo Municipal de Cuenca.

Texto Unificado de Legislación Secundaria del Ministerio del Ambiente, Libro VI, Anexo 5, TULSMA, (2015). En Acuerdo Ministerial 097A.

Burneo, C. A. (2007). Contaminación ambiental por ruido y estrés en el Ecuador Quito: Universidad Central del Ecuador.

FHWA -Federal Highway Administration. 2004. Traffic Noise Model. Version 2.5 Look-up Tables. User's Guide. U.S. Department of Transportation, FHWA-HEP-05-008. Final Report

Martínez J., Delgado O. (2015). Monitoreo de ruido ambiente en la ciudad de Cuenca, muestreo 2009 - 2014. Ruido 2014.

Martínez J., Delgado O. (2015). Registro de ruido ambiente 2015, en los 30 sitios de monitoreo de la ciudad de Cuenca.

GADMCC (2007). Estudio de actualización operacional del sistema integrado de transporte de Cuenca. Cuenca: GAD Municipal de Cuenca.

García González, J. A., & Cebrián Abellán, F. (2006). La interpolación como método de representación cartográfica para la distribución de la población: aplicación a la provincia de Albacete. En M. T. Camacho, J. A. Cañete & J. J. Lara Valle (Eds.), El acceso a la información espacial y las nuevas tecnologías geográficas (pp. 165-178). Granada: Editorial Universidad de Granada. Recuperado de [http://www.age-geografia.es/tig/docs/XII\\_1/012%20-%20Garcia%20y%20Cebrian.pdf](http://www.age-geografia.es/tig/docs/XII_1/012%20-%20Garcia%20y%20Cebrian.pdf)

# El SIGAM: desarrollo de un sistema de información geológico ambiental minero para gestión de datos en el ámbito estatal

Marquínez Jorge<sup>1</sup>, García Pilar<sup>1</sup>, Pedreira José Ángel<sup>3</sup>, Candaosa Gabriel<sup>2</sup>, Álvarez Saúl<sup>3</sup>, Federico Ferpozzi<sup>2</sup>, Chavez Silvia<sup>2</sup>, Avanzas Rubén<sup>3</sup>, Zappettini Eduardo<sup>2</sup>, Sánchez David<sup>1</sup>, Fernández Juan Carlos<sup>1</sup>, Colina Arturo<sup>1</sup>, Marín Graciela<sup>2</sup>

1 Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDU-ROT)/Universidad de Oviedo  
Mieres/Asturias/España  
marquinez@uniovi.es

2 Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM)/Servicio Geológico Minero de Argentina (SEGEMAR)  
Buenos Aires/Argentina  
graciela.marin@segemar.gov.ar

3 Sociedad Asturiana de Diversificación Minera (SADIM)  
Ciaño/Asturias/España  
jangel.pedreira@sadim.es

## RESUMEN

En el marco del Subprograma Gestión Ambiental Minera de la Secretaría de Minería, se ha desarrollado el Sistema de Información Geoambiental Minera (SIGAM) con el objetivo de contribuir a la modernización e implantación de nuevas capacidades en el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). El proceso conlleva el diseño del modelo de datos y el desarrollo de herramientas específicas que facilitan la incorporación de datos previos y de nueva información Geoambiental, integrando la información del Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM) en un único sistema de datos interrelacionados y facilitando la preparación de archivos en formato mxd para la impresión de mapas. El modelo de datos permite aglutinar la información generada por el IGRM, facilitando la interrelación de las distintas capas temáticas, potenciando el análisis, la eficiencia en el manejo de datos y sus posibles aplicaciones. Este modelo se implementa sobre una Geodatabase (GDB) corporativa que contiene datos topográficos, geológicos, mineros y geoambientales de la República Argentina y es el modelo para generación de las GDB de producción sistemática de las cartas del IGRM. Paralelamente se dota al SIGAM de herramientas GIS que facilitan la utilización de esos datos, permitiendo una optimización del tiempo de trabajo, tanto en la incorporación como en el análisis e impresión de los datos. Todos los componentes desarrollados para el SIGAM lo convierten en un ejemplo de un proyecto GIS para la gestión en el ámbito estatal de datos geológicos y ambientales, facilitando la optimización de recursos y la utilización de la información geográfica.

Palabras clave: **SIGAM, GIS, modelo de datos, geología ambiental, programación.**

## ABSTRACT

*Within the framework of the Subprogram Mining Environmental Management of the Ministry of Mining, the Information System of Mining Geo-environment (SIGAM) has been developed with the aim of contributing to the modernization and implantation of new capacities in the Argentinian Geological Mining Service (SEGEMAR). The process entails the design of the data model and the development of specific tools that facilitate the incorporation of previous data and new Geo-environmental information, integrating the information of the Institute of Geology and Mineral Resources (IGRM) in a unique interrelated data system and facilitating the preparation of archives in mxd format for map printing.*

*The data model allows to agglutinate the information generated by the IGRM, facilitating the interrelation of the different thematic layers, enhancing the analysis and efficiency in the handling of data and its possible applications. This model is implemented on a corporative Geodatabase (GDB) that contains topographic, geologic, mining and geo-environmental data of the Argentine Republic and is the model for the generation of the GDB of the systematic production of letters of the IGRM. At the same time, it provides the SIGAM with GIS tools that facilitate the use of these data, allowing an optimization of the working hours, both in the incorporation and in the analysis and the printing of the data. All the components developed for the SIGAM make it an example of a GIS project for the state management of geological and environmental data, encouraging the optimization of resources and the use of the geographical information.*

**Keywords:** *SIGAM, GIS, data model, environmental geology, programming.*

## I. INTRODUCCIÓN

La Ley No 24.224, de Reordenamiento Minero, en su Capítulo I, de las Cartas Geológicas de la República Argentina, dispuso la necesidad de efectuar el relevamiento geológico regular y sistemático del territorio continental, insular, plataforma submarina y Territorio Antártico de la República Argentina, en diferentes escalas (artículo 1).

Para dar respuesta a este mandato la Dirección de Geología Regional, perteneciente al IGRM tiene la responsabilidad de implementar el Programa Nacional de Cartas Geológicas a escalas 1:250.000 y 1:100.000. El ámbito geográfico del Proyecto es todo el territorio nacional distribuido por hojas a escala 1:250.000 y 1:100.000. Con el objetivo de completar la primera versión de cartas geológicas de todo el territorio se ha seleccionado la escala 1:250.000.

En concordancia con el empleo de las nuevas tecnologías de información, en el contexto del Programa Nacional de Cartas Geológicas y un convenio entre SEGEMAR y el Instituto Tecnológico Geominero de España, se realizaron las primeras versiones de la norma de digitalización de mapas geológicos. Esta norma, al amparo del Programa de Ayuda al Sector Minero Argentino (PASMA) se revisó y adaptó la Normativa SIG-NOR-IGRM-003, al Sistema de Producción de Cartas Geológicas a escala 1:250.000 (SEGEMAR, IGRM, 1999). El avance de la tecnología GIS y la evolución de los formatos obligan a una actualización de la norma para adaptarse a los nuevos conceptos.

En la actualidad los formatos cover de ArcInfo, previamente utilizados, se han adaptado a los formatos más modernos de Base de Datos Espacial (GDB), estructurados en Feature Dataset (FDS) y Feature class (FC) de ArcGIS, lo que implica importantes modificaciones tanto en el modelo de datos como en el método de captura y tratamiento de las capas de información.

El trabajo se fundamenta en los estándares de ArcGIS (Law & Collins, 2013), dado que el IGRM ha optado por este programa para la gestión de sus datos geográficos.

El sistema de proyección oficial ha pasado de ser Campo Inchauspe 69 a POSGAR 94 (en el año 1997) y finalmente a POSGAR 07 en el año 2009.

También la anterior estructura en hojas, para el almacenamiento de la información, ha evolucionado hacia una base de datos continua de todo el País, lo que implica que el almacenamiento de los datos en coordenadas geográficas sea el más indicado, independientemente del formato de la representación gráfica de las hojas impresas.

Además de adecuar los modelos y protocolos para la cartografía Geológica producida por la Dirección de Geología Regional propiamente dicha, se persigue elaborar modelos y protocolos

para el resto de la información generada por el IGRM perteneciente a la Dirección de Recursos Geológico Mineros y a la Dirección de Geología Ambiental y Aplicada.

Surge, por tanto la necesidad de la definir normas de digitalización y edición, necesarias para que pueda realizarse un trabajo coherente y coordinado. Las normas deben ser cumplidas en forma estricta especialmente en cuanto a la nomenclatura asignada a cada uno de los ficheros resultantes, dado que los procesos de computación relacionados con el tratamiento de la información, no admiten ambigüedades.

Debemos distinguir entre la GDB y los mapas que se componen a partir de ella. La base de datos hace referencia a la organización, estructura y relaciones de la información digital georreferenciada.

Con esta información y la incorporación de otros elementos gráficos (no necesariamente georreferenciados) como textos, figuras y/o imágenes se componen los mapas finales con objeto de imprimirlos o consultarlos. Esta composición debe ajustarse al formato adoptado por el IGRM, para organizarse en una colección de cartas geológicas.

Se trata de establecer las bases para conseguir la unificación de la producción cartográfica del IGRM, para obtener un producto homogéneo en apariencia y calidad, estableciendo las normas para la edición del mapa en su conjunto, y para cada uno de los elementos que lo componen. Permitiendo así definir los procesos de automatización para mejorar la edición y el control de calidad del resultado final.

El proyecto pretende en el diseño y puesta en funcionamiento de un sistema de información Geoambiental para el SEGEMAR, cumpliendo los siguientes objetivos:

1. Creación de un modelo de datos para el almacenamiento y gestión de los datos del IGRM.
2. Implantación del modelo de datos en una base de datos corporativa.
3. Elaboración de normas, procedimientos y herramientas de digitalización de los datos.
4. Elaboración de normas, procedimientos y herramientas para las salidas gráficas de las principales cartas temáticas generadas en el IGRM

Las normas y procedimientos buscan elaborar un protocolo de trabajo para la digitalización, edición, carga de atributos e incorporación, al modelo de hoja del SIGAM, de los datos necesarios para la realización de las Cartas del IGRM. Así mismo marcan las líneas y directrices a seguir para la elaboración de las salidas gráficas correspondientes.

Las herramientas GIS generadas a lo largo del proyecto tienen como finalidad facilitar, a los técnicos del IGRM, las cuantiosas y laboriosas tareas de edición, incorporación de información del modelo antiguo e impresión de las cartas temáticas.

Los objetivos se adaptan a las necesidades de las tres Direcciones del IGRM para dar respuesta al manejo de los datos de las cartas temáticas que producen:

- Carta geológica.
- Carta minerometalogenética.
- Carta de minerales industriales rocas y gemas.
- Carta geoquímica.
- Carta de peligrosidad geológica.
- Carta geoambiental.

## II. MÉTODO

El trabajo necesario para alcanzar los objetivos del SIGAM se ha estructurado en tres fases:

- Desarrollo e implantación del modelo de datos del SIGAM.
- Desarrollo de normas y procedimientos.
- Desarrollo de las herramientas GIS para facilitar el manejo de los datos y la impresión de las cartas temáticas.

### A. EL MODELO DE DATOS DEL SIGAM

El modelo de datos que se utiliza ha sido generado a partir del trabajo desarrollado con profesionales y técnicos del SEGEMAR y los equipos de la Universidad de Oviedo y SADIM. Se pretende dar respuesta a las necesidades surgidas para el manejo de gran cantidad de información geográfica organizada en diversas temáticas.

Se utiliza el formato de datos propio de ArcGIS, que organiza la información existente de manera sencilla y coherente en conjuntos de datos llamados FDS y en clases de elementos o FC con sus atributos y sus propias normas de relación. Estos FDS, FC, tablas, relaciones y vistas se organizan dentro de una GDB. Cada capa u objeto que utilizamos tiene una serie de atributos que permiten definir sus características, y que se implementan mediante campos.

Este sistema permitirá almacenar toda la información necesaria para la edición e impresión de las cartas temáticas en una única base de datos geográfica; evitar duplicidades de los datos tanto gráficos como tabulares simplificándolos en la medida de lo posible; revisar la coherencia topológica y permitir la representación conjunta de varias capas temáticas.

Dado que gran parte de los datos almacenados tienen referencias geográficas precisas, es necesario definir con precisión los sistemas de coordenadas utilizados en cada aspecto de la digitalización de los datos. Esta información queda almacenada de manera automática en los metadatos de las capas.

La información digital se almacenará en una GDB continua para todo el país. Esto hace inviable el almacenamiento continuo de los datos en sistema de proyección Gauss-Krüger o de cualquier otro sistema de proyección cartesiana, dada la gran extensión del país, la elección de un huso determinado implicaría la deformación de las áreas que se prolongaran fuera de éste. Por este motivo la información de la GDB continua está almacenada en coordenadas Geográficas.

Sin embargo las cartas se imprimirán y visualizarán en coordenadas Gauss-Krüger POSGAR 07, en la faja correspondiente a cada hoja (tal y como está estipulado por el Instituto Geo-

gráfico Nacional que es el Órgano Rector en Materia de Cartografía y Geodesia de Argentina).

Para la digitalización y la impresión de mapas se utilizarán GDB más pequeñas que abarcan solo una hoja 1:250000 y se generan ficheros de ArcMap (MXD) en los que se replicará la información de base (datos topográficos, ortofoto, imagen satelital etc.) del modelo continuo y se definirán las capas vacías a digitalizar. La información pre-cargada en la GDB de hoja puede provenir de diferentes sistemas de coordenadas. Así pues la información que esté cargada desde la GDB corporativa continua estará en coordenadas geográficas, también se pueden incorporar imágenes que estén en otros sistemas de coordenadas. Sin embargo el marco de datos de trabajo (el sistema de visualización del MXD) de cada hoja se definirá en coordenadas Gauss-Krüger POSGAR07 en la faja correspondiente a cada hoja.

El técnico que incluya la información del mapa la verá en el mismo sistema que el material cartográfico que esté utilizando y en el mismo sistema que se imprimirá la hoja, a pesar de que se estará almacenando en sistema de coordenadas geográficas.

### B. NORMAS Y PROCEDIMIENTOS

Para unificar criterios de trabajo, ajustados al modelo de datos, se han desarrollado diferentes documentos procedimentales respecto a la edición de cartas temáticas de las tres Direcciones del SEGEMAR. Estos documentos tienen en cuenta las normas previas (SEGEMAR, IGRM, 1999; SEGEMAR 2000, 2000b) y las adaptan a la situación actual del modelo de datos y a la actualización de los sistemas informáticos.

Los procesos de edición se definen en los documentos elaborados a tal fin siguiendo los procedimientos de ESRI (2004).

También se han desarrollado protocolos de impresión de cada una de las seis cartas temáticas principales del centro, en los que se definen estructuras, formatos, maquetación tipos de letra y elementos principales de cada una de las salidas gráficas.

### C. HERRAMIENTAS GIS DESARROLLADAS

Una vez definido el modelo de datos, y paralelamente a su desarrollo se pone en marcha la programación de una serie de herramientas que faciliten el trabajo diario de los técnicos del SEGEMAR.

Antes de comenzar la fase de programación, y en una fase previa, se realiza un exhaustivo análisis de las tareas llevadas a cabo en cada una de las áreas temáticas.

En la fase de programación se desarrolla el código necesario para la puesta en marcha de todas las herramientas. Para este proceso se utiliza el lenguaje de programación Python. Se trata de un lenguaje de programación gratuito, multiplataforma y de código abierto que es potente y fácil de aprender. Es ampliamente utilizado y compatible.

Para acceder a las herramientas de geoprocésamiento así como a las funciones adicionales de ArcGIS se utiliza el módulo ArcPy, que permite crear flujos de trabajo simples o complejos de manera rápida y sencilla, completando la biblioteca de Python (Zandbergen, 2014).

Además de ArcPy se utilizan otros complementos de programación en Python como son:

- os: interfaz de funcionalidades dependientes del sistema operativo.
- shutil: operaciones de alto nivel sobre ficheros y colecciones de ficheros.

- glob: parseo de rutas y comparación a patrones específicos.
- gc: módulo interfaz para el garbage collecto.

Esto permite que el SIGAM se configure, mediante ficheros y herramientas de ArcGIS, para que puedan alcanzarse los objetivos de productividad marcados en un espacio muy corto de tiempo.

Todos los elementos que forman las cartas impresas se organizan y almacenan en formato digital de manera que puedan ser fácilmente accesibles mediante un sistema de estructuras sistemáticas de datos.

#### 1) Edición y carga de datos

Los scripts de edición y carga de datos se estructuran para el cumplimiento de los siguientes aspectos:

##### a) Carga del modelo de datos en GDB de hoja.

El script debe crear la GDB de ArcSDE de hoja mediante la extrapolación del modelo continuo y establecer una serie de criterios unificados para todas las hojas.

El script configura subtipos y dominios, asegura el versionado de los dataset correspondientes; carga la topografía de hoja; crea el marco de trabajo y recorta la información continua necesaria.

Todos estos procesos se automatizan con las herramientas creadas, lo que facilita tanto la puesta en marcha de una hoja como la unificación de criterios.

##### b) Organización del espacio de trabajo.

La carga preliminar, de datos de apoyo y capas a digitalizar, es uno de los procesos más importantes a la hora de comenzar con la digitalización y edición de cartografía. Sin embargo, este proceso puede ser un poco caótico y laborioso si no se perfilan con anterioridad ciertos elementos.

La herramienta desarrolla los pasos necesarios para cumplir los procesos de carga y organización de datos más relevantes:

- Creación de las carpetas necesarias en el repositorio, estructuradas en función de las temáticas.
- Creación de los documentos de mapa de trabajo de ArcMap (mxd).
- Carga en el mxd correspondiente de las capas de referencia preestablecidas.

#### 2) Incorporación de datos geológicos de formatos previos

Para ellos se elaboran scripts en ArcPy. Estos scripts pretenden actualizar el esquema previo de GDB, que conservaba las capas relativas a los tics, labels, líneas y, en su caso, polígonos o puntos, directamente importados de ArcInfo, y que no se adaptaba al modelo establecido actualmente.

La automatización para la transposición a la nueva GDB de estos datos aplica los siguientes criterios:

- Elimina sistemáticamente las FC de tics y labels, heredadas del modelo ArcInfo.
- Se eliminan de la GDB los elementos que no tienen georreferenciación como perfiles columnares y transversales y el cuadro estratigráfico y se almacenan en repositorio de datos.
- Elimina de la GDB los elementos que pueden generarse automáticamente, como referencias geológicas y topográficas y otros elementos auxiliares.
- Reestructura la organización de las capas en FDS, ajustándose al modelo establecido.

- Reestructura la topografía de acuerdo a los criterios del modelo de datos, establecidos previamente con el personal de SEGEMAR.

#### 3) Salidas gráficas

Los scripts de salidas graficas persiguen obtener las cartas temáticas impresas en el formato definido desde SEGEMAR y plasmado en los protocolos de impresión elaborados en la fase previa. La automatización de este proceso debe facilitar a los usuarios las tareas de maquetación y geoprociamiento.

A la hora de realizar la salida gráfica de una carta temática hay una gran cantidad de elementos que definen su estructura, tales como escala, imágenes, tipografía, leyendas... Las cartas contienen textos informativos e imágenes que pueden variar en función de la hoja y temática a generar. Por este motivo, y como solución dinámica, la automatización recoge esta información de diferentes archivos externos ubicados en distintos directorios dentro de la carpeta raíz de la hoja correspondiente. Todos estos archivos deben ser previamente revisados o, en su caso, rellenados siguiendo el formato descrito en la norma correspondiente.

La fase final para la puesta en marcha de las herramientas desarrolladas es la revisión de los resultados de los distintos procesos verificando que cumplen los estándares establecidos en las normativas aprobadas.

### III. RESULTADOS

El resultado final de todos los procesos desarrollados es un SIGAM avanzado y diseñado para incluir la diferente información generada en el IGRM.

#### A. BASE DE DATOS SEGÚN EL MODELO DE DATOS ESTABLECIDO

El modelo de base de datos corporativa resultante está construido sobre ArcSDE de ArcGIS. En este modelo se han definido 22 FDS con al menos 83 FC y 34 tablas auxiliares, 31 Relationship class y numerosas Vistas. También se establecieron 219 dominios para los campos definidos en las FC con más de 1000 valores asignados en los diferentes dominios.

Las diferentes Direcciones de IGRM utilizan este único modelo de datos compartido, si bien la carga y edición de los datos es propia de cada una de ellas de manera diferenciada.

Así la Dirección Geología Regional organiza los datos del modelo relativos a sus temáticas principales y que se han agrupado en las FDS de Geología, GeologíaEsquemas y GeologíaEstCampo además de las tablas de UnidadesLitoloestratigraficas y ComposiciónLitológica. Estos FDS y tablas son la base de información para otras áreas temáticas.

La Dirección de Recursos Geológico Mineros organiza los datos del modelo organizados en los FDS de YacimientosMinerales, MineroMetalogenetica, Geofisica y Geoquimica.

Desde la Dirección de Geología Ambiental y Aplicada se manejan los FDS de Edafología, Geomorfología, Hidrogeología Litología, MedioBiotico, PeligrosidadGeologica, ProcesosGeológicos, y SocioEconomia.

La unidad de Sensores Remotos y SIG coordina las tareas de los diferentes grupos y organiza la administración de la Base de datos y las FDS, imágenes, tablas y otros elementos de uso común.

Los datos de los FDS de Topografía y se cargan a partir de los datos proporcionados por el Instituto Geográfico Nacional

ajustándolos al modelo establecido y añadiéndole representaciones para su visualización. Datos para la representación de los esquemas auxiliares en las cartas impresas y que se representan a escala de menor detalle son organizados en FDS propios (Topografía25M y Geología25M).

Toda los datos estructurados se encuentra interrelacionados entre sí a través de las múltiples herramientas de datos disponibles en ArcGIS, tales como Vistas o Relationship class.

**B. NORMAS Y PROCEDIMIENTOS**

Se elaboraron tres protocolos individualizados para la digitalización y carga de datos de las diferentes áreas temáticas y 6 protocolos para el diseño de las salidas graficas de cada uno de las cartas temáticas principales.

Los protocolos de digitalización incluyen la descripción de los elementos del modelo de datos que afectan a cada grupo del trabajo, las normas generales de digitalización de cada tipo de entidad y las normas para la carga de datos tanto de los

elementos georreferenciados como de otros elementos presentes en la carta impresa (textos, cuadros, imágenes etc.).

En los protocolos de impresión se establece la distribución de los bloques y secciones del mapa impreso (Figura 1) y se definen con precisión los márgenes, tipografía y otras estructuras del formato (interlineado, espaciado alineación, etc.). Así mismo se define la denominación y características de los elementos de la composición para su uso en la programación del script de salida gráfica.

**C. HERRAMIENTAS GIS DESARROLLADAS**

Para optimizar las tareas realizadas por los técnicos del IGRM se crean tres herramientas GIS específicas, divididas en módulos de trabajo.

Cada módulo se compone de un conjunto de scripts que realizan las funciones automatizadas, y que se crean mediante la utilización de ArcPy. En total se desarrollan 17 scripts que forman el núcleo principal de los módulos de trabajo ya comentados.

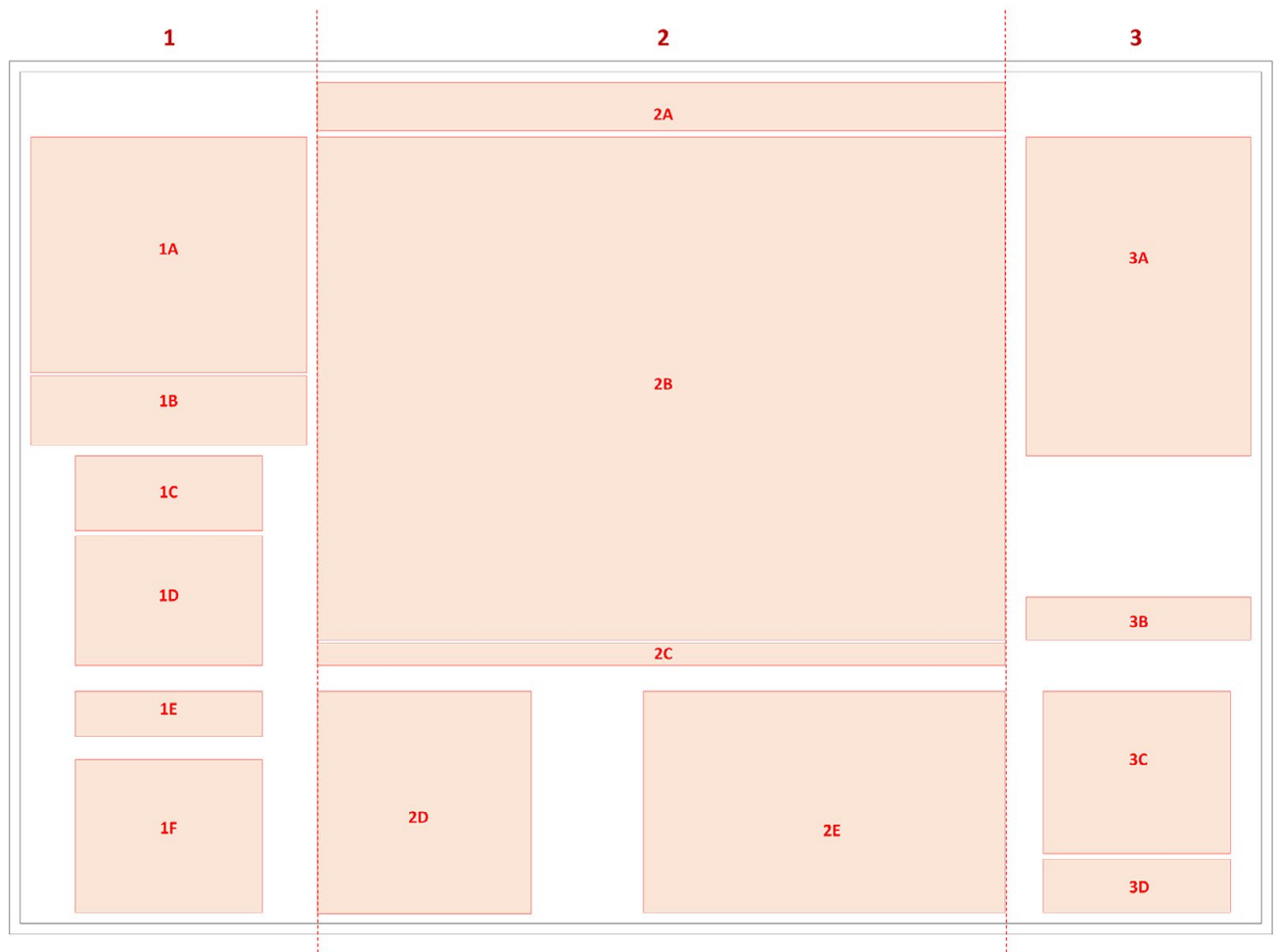


Figura 1. Ejemplo de distribución de los bloques y secciones correspondiente a la Carta de Minerales Industriales, Rocas y Gemas 1:250.000. Bloque 1 (izquierda): 1A. Cuadro principal; 1B. Información litológica; 1C. Referencias geológicas; 1D. Referencias topográficas; 1E. Fuentes de la base topográfica; 1F. Esquemas de ubicación. Bloque 2 (central): 2A. Cabecera; 2B. Mapa de Minerales Industriales, Rocas y Gemas; 2C. Información técnica cartográfica; 2D. Listado de yacimientos; 2E. Referencias de litotectos y mineralotectos. Bloque 3 (derecha): 3A. Esquema regional; 3B. Modelos de depósitos; 3C. Clasificación de los yacimientos; 3D. Escala de tamaño de depósitos.

Para la utilización de los módulos por parte de los técnicos del IGRM se implementa una barra de herramientas propia, la SIGAM Toolbar (Figura 2), que se instala en ArcGIS mediante un archivo .esriaddin ArcGIS utiliza add-ins que facilitan la personalización y la extensión de las aplicaciones de ArcGIS for Desktop y que son clave para compartir una herramienta en Python.

Además de la Toolbar del SIGAM, todos los módulos se desarrollan en una Toolbox de ArcGIS, la Toolbox SIGAM, que contiene todas las herramientas necesarias para la puesta en marcha de los distintos procesos.

Para la selección de las cartas y la puesta en marcha de los módulos se ha creado un archivo .mxd (Figura 3) que permite ejecutar las herramientas carga de datos e importación del modelo antiguo (solo geología) y producción de cartas temáticas para las hojas 1:250000.

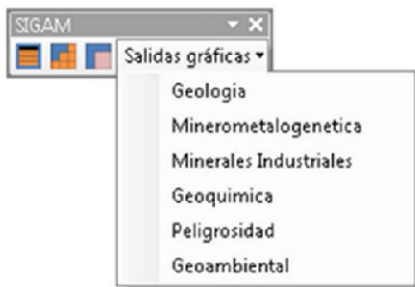


Figura 2 Aspecto de la herramienta del SIGAM, con el desplegable de salidas gráficas. Botón para la configuración de elementos. Botón para la carga de hojas. Botón para la selección de temática.

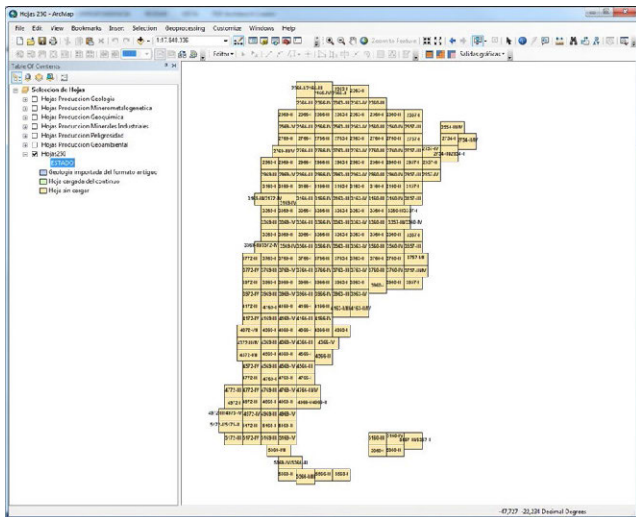


Figura 3. Fichero mxd para la puesta en marcha de las herramientas en una hoja determinada.

1) Módulo de carga de Hojas e incorporación de datos previos de geología

El módulo de Carga de datos de las hojas 250000 añade a la base de datos ArcSDE que contendrá los datos de hoja la información necesaria y los elementos imprescindibles para la digitalización y producción de todas las Hojas 1:250000.

El módulo de Carga de datos realiza los siguientes procesos:

- Crea los elementos necesarios de trabajo: la carpeta de hoja seleccionada, las carpetas genéricas (Raster\_generico y Plantillas\_hoja) y se copian los archivos de trabajo necesarios (layer y calc).

- Crea las variables para exportar e importar el esquema del ArcSDE continuo, cargando el modelo de Hoja a la GDB vacía en ArcSDE y versionando los dataset correspondientes.

- Realiza diversas funciones con las capas de trabajo: crear el marco de la Hoja correspondiente, carga de la topografía de la Hoja seleccionada y recorte de datos.

Este módulo dispone de una casilla de activación para Incorporar la información de Geología del modelo antiguo lo que pondrá en marcha la herramienta correspondiente (Figura 4).

2) Módulo de selección de temáticas

El módulo de Selección de carta temática es el paso posterior al módulo de Carga de datos. Este módulo crea los elementos específicos para cada una de las cartas correspondientes después de que el módulo de Carga de datos creara los elementos principales de la hoja.

El módulo de selección de temáticas realiza los siguientes procesos para la temática seleccionada (Figura 5):

- Carga en el mxd de la temática seleccionada las capas de trabajo de hoja.
- Carga de la sentencia SQL para realizar las Vistas espaciales.
- Realiza diversos geoprocamos y análisis de datos.

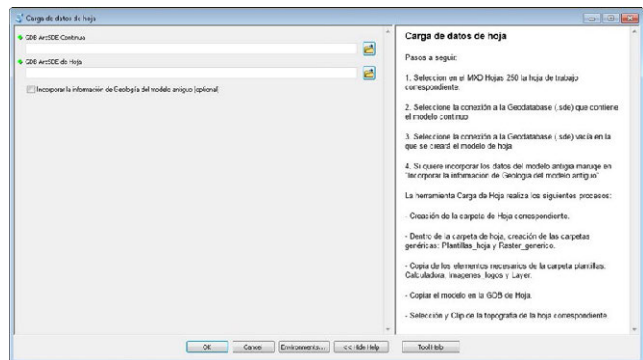


Figura 4. Aspecto del módulo de carga de datos de hoja.

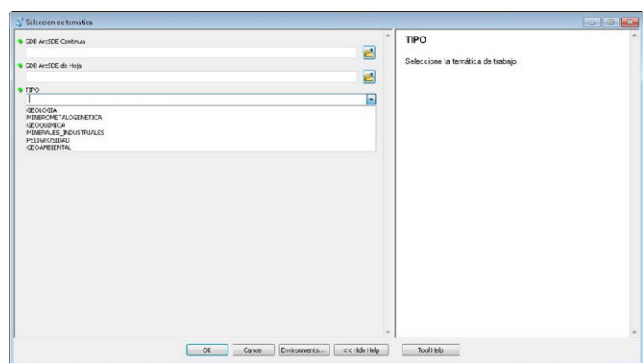


Figura 5. Aspecto del módulo de carga de datos de hoja.

3) Módulo de salidas gráficas

Una vez se encuentre disponible toda la información correspondiente a una temática (tras el proceso de edición y carga de datos), el módulo de salida graficas puede usarse para dar formato a los elementos que participan en los mapas finales de las distintas cartas y situarlos en el marco de un layout. Este módulo es una herramienta que facilita en gran medida las tareas de maquetación para la impresión del mapa. Al mismo tiempo, unifica el formato de las cartas asegurando el cumplimiento de las normas establecidas para cada temática.



Además de dimensionar y situar correctamente todos los elementos gráficos que conforman cada carta como son leyendas, rótulos, mapas, marcos, escalas, etc. todas las cartas contienen textos informativos e imágenes que varían en función de la hoja. Como solución dinámica, el módulo recoge automáticamente esta información de diferentes archivos externos ubicados en distintos directorios.

Cada uno de los 6 scripts que contiene este módulo de salidas gráficas realiza, entre otras tareas de maquetación, los siguientes procesos básicos:

- Carga todas las capas y vistas necesarias para la temática correspondiente en uno o varios MXDs plantilla aplicando, si es preciso, el estilo o formato correspondiente a cada capa o vista.
- Obtiene los parámetros correspondientes de la hoja necesarios para poder calcular la composición y las distintas dimensiones del mapa: convergencia, número de faja, nombre de la hoja, provincias, dimensiones y extensión del marco de la hoja, coordenadas, etc.
- Rotula textos, inserta imágenes o gráficos y aplica los parámetros de proyección, convergencia, extensión, escala, etc. a los distintos mapas que conforman la carta.
- Dimensiona y sitúa todos los elementos gráficos de la carta temática y guarda el/los MXD/s para su posterior impresión.

El script es una herramienta de apoyo, necesita trabajo de postproceso (que en general se resuelve en menos de 1 hora) para conseguir el resultado final (Figura 6). Se consigue por tanto reducir muy considerablemente los tiempos de producción del mapa.

**IV. CONCLUSIONES**

Con la colaboración de los técnicos especialistas en las distintas áreas de IGRM (Geología Regional, Recursos Minerales, Geología Ambiental, Sensores Remotos y SIG) se desarrolló el modelo de datos del SIGAM para la gestión de los datos del IGRM, que permite la interrelación de un gran volumen de capas de datos y el uso de datos comunes, sin duplicidades.

El modelo garantiza la integridad de los datos y la disponibilidad simultánea para varios usuarios.

El sistema desarrollado consta de un modelo de datos de producción (de hoja) para el trabajo de edición y carga de datos y un modelo de datos continuo para el almacenamiento de los datos definitivos de las diferentes temáticas y hojas.

Los datos se almacenan en coordenadas geográficas y se visualizan en el mxd y en las cartas impresas en el sistema de referencia oficial (POSGAR07) en la faja correspondiente a cada hoja.

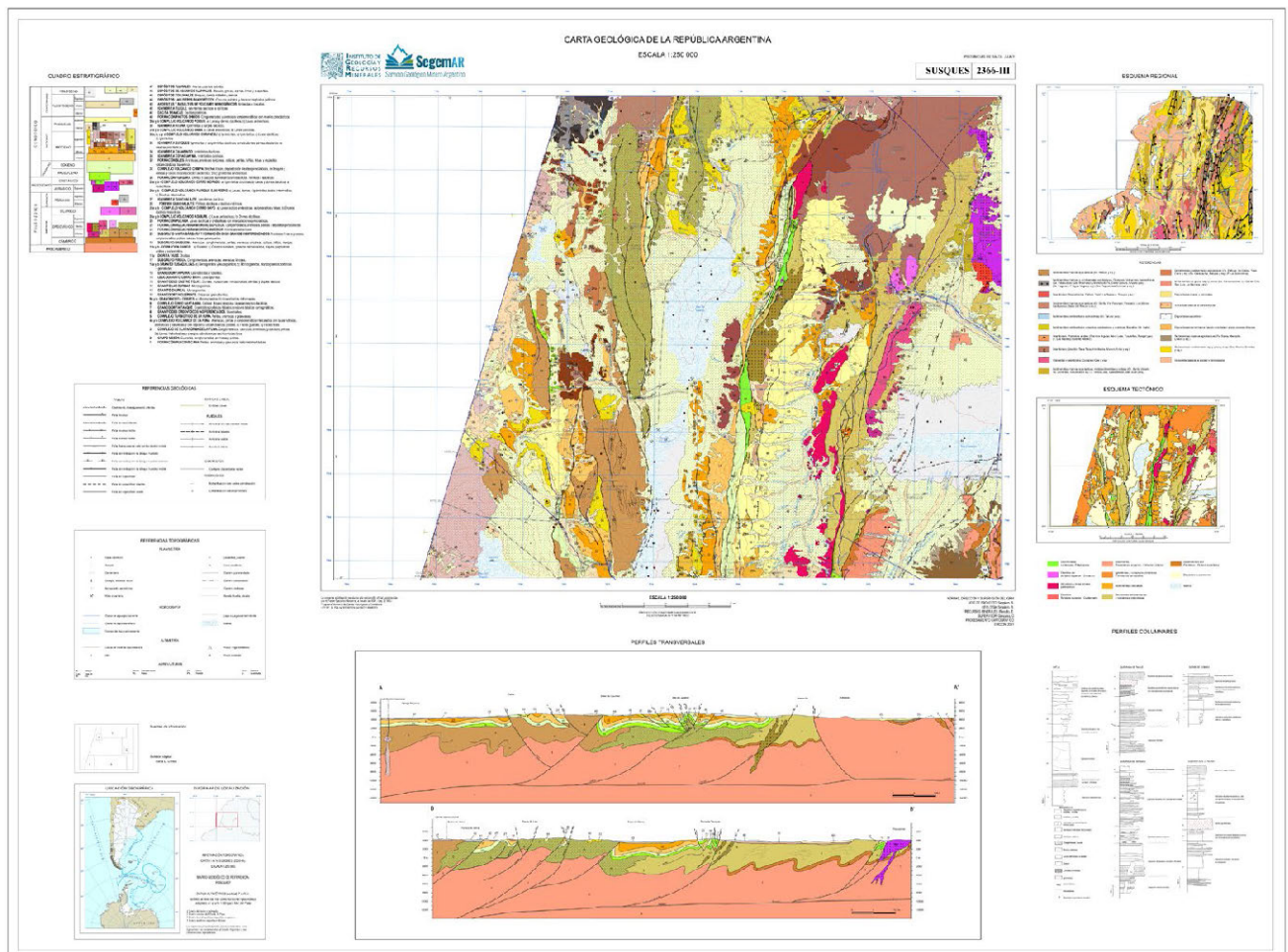


Figura 6: Aspecto del mapa final tras el script y el postproceso

Es un modelo flexible que permite la inclusión de nuevas capas sin afectar necesariamente al funcionamiento de las existentes.

Los protocolos desarrollados ayudan a mantener la homogeneidad de los datos y a estandarizar el método de trabajo, si bien serán necesarias actualizaciones frecuentes para adaptarlos tanto a los avances en las herramientas de trabajo (distintas versiones del programa) como a los avances procedimentales que pudieran ocurrir.

Las herramientas que se han desarrollado facilitan las tareas de:

- La digitalización y carga de atributos de las diferentes cartas temáticas según el modelo y los protocolos establecidos.
- La incorporación de datos geológicos preexistentes al modelo de datos establecido.
- La impresión de las 6 cartas temáticas principales desarrolladas desde el IGRM.

Las herramientas mejoran significativamente los tiempos de producción de cartografía temática del IGRM.

Estas herramientas están en su fase de implementación y como en todo sistema productivo, son susceptibles de mejoras para ir amentando la eficiencia de las mismas y ajustándolas al sistema de trabajo y corrigiendo los errores que se demostraran con su uso.

El resultado final del proyecto, es un GIS potente con herramientas avanzadas, que permite una eficaz y avanzada forma de crear, gestionar y analizar información Geológica Ambiental Minera del IGRM. Además, facilita la unificación y normalización de los procesos de validación, la normalización de incorporación de información y el desarrollo de cartografía geológica y temática.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del contrato Entre la Sociedad Asturiana de Diversificación Minera (SADIM, S.A.) y el Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDURROT) de la Universidad de Oviedo para asistencia técnica en el diseño, la metodología de ejecución y la supervisión del relevamiento sistemático de información geoambiental, y para el diseño y puesta en funcionamiento de un sistema de información Geoambiental.

A su vez el contrato mencionado se enmarca en el proyecto adjudicado por la Secretaría de Minería de la Nación de la República Argentina a SADIM para realizar los servicios de consultoría del proyecto mencionado.

El proyecto se ha podido llevar a cabo gracias a la participación de todo el equipo de técnicos y directores del IGRM que han participado activamente con sus comentarios, aportaciones y correcciones en los diferentes momentos de ejecución de este trabajo.

A todos ellos nuestro más sincero agradecimiento.

## REFERENCIAS

ESRI (2014): Biblioteca de ayuda de ArcGIS. ESRI. Documento on line: <http://resources.arcgis.com/es/help/main/10.2/index.html#/na/00qn0000001p000000/>. Fecha de consulta: 10-05-2014.

SEGEMAR, IGRM. (1999) Normativa para la digitalización de Cartas geológicas a escala 1:250.000. Programa nacional de cartas geológicas de la República Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales. Revisión: 02. Clave: SIG-NOR-IGRM-003. 201 pp.

SEGEMAR (2000): Normativa para el sistema de producción de cartas geológicas a escalas 1:100.000 y 1:250.000. SEGEMAR, Instituto de Geología y Recursos Minerales. Revisión: 02. Clave: SIG-NOR-IGRM-002. 138 pp.

SEGEMAR (2000b): Programa Nacional de Cartas Geológicas de la República Argentina. Modelo de Carta Geológica; Normativa de realización. SEGEMAR, Instituto de Geología y Recursos minerales. Revisión: 01. Clave: GEO-NOR-IGRM-001. 138 pp.

Zandbergen, P.A. (2014): Python scripting for ArcGis. Redlands, United States: Esri Press. 358 pp

Law, M. y Collins, A. (2013): Getting to Know ArcGIS for Desktop, Third Edition, Redlands, United States: Esri Press, 768 p.

# Geotecnologias aplicadas ao estudo de desastres naturais causados pela mudança no uso da terra em microbacia hidrográfica

Piroli, Edson Luís<sup>1</sup>, Lourenço, Gabriela<sup>1</sup>, Santos, Vanessa Ramos dos<sup>2</sup>

1 UNESP - Universidade Estadual Paulista - Câmpus de Ourinhos. Av. Renato da Costa Lima, 451, Ville de France, 19903-302 - Ourinhos, São Paulo, Brasil  
piroli@ourinhos.unesp.br

2 UNESP - Universidade Estadual Paulista - Câmpus de Presidente Prudente. Rua Roberto Simonsen, 305, Presidente Prudente, 19060-900, São Paulo, Brasil  
vanessaramosgeo@gmail.com

## RESUMO

A ocupação de espaços sem planejamento e de maneira intensificada tem causado problemas cada vez maiores em vastas regiões do globo terrestre. Um dos mais significativos está relacionado ao manejo das águas pluviais, que via de regra, são desconsideradas na implantação de núcleos urbanos, e que causam importantes transtornos, riscos e prejuízos quando acumuladas na superfície, sem um direcionamento adequado ou sem sistemas de retenção e de infiltração no solo. Neste contexto, esta pesquisa avaliou o uso da terra na cabeceira da microbacia do córrego Monjolinho localizada na área urbana do município de Ourinhos, nos anos de 1972 e de 2014, e as mudanças ocorridas entre os anos de 1972 e de 2014. Utilizou-se na classificação das imagens o aplicativo ArcGIS 10.3 e na avaliação das mudanças o módulo LCM (Land Change Modeler) do software Idrisi Taiga. Verificou-se que houveram importantes transformações na cobertura do solo da área estudada, influenciando, nas taxas de infiltração da água das chuvas no solo e nas taxas de escoamento superficial. Esta condição tem causado enxurradas e inundações na área. Após as análises verificou-se que as geotecnologias utilizadas permitiram a realização das atividades necessárias com rapidez e confiabilidade, permitindo a formação de um banco de dados contendo as características da área e os locais de maior risco. O banco de dados gerado pode ainda ser utilizado pelos gestores públicos como fonte de informações para o desenvolvimento de projetos de proteção dos recursos naturais e da população.

Palabras clave: **geoprocessamento, sensoriamento remoto, recursos hídricos, água, Sistemas de Informações Geográficas.**

## ABSTRACT

*The unplanned and intensified spaces occupation has caused increasing problems in vast regions of the globe. One of the most significant is related to the management of rainwater, which, as a rule, is disregarded in the implantation of urban space, causing significant disturbances, risks and damages when accumulated on the surface, without adequate steering or without retention systems and infiltration. In this context, this research evaluated the land use at the headwaters of the Monjolinho stream watershed located in the urban area of Ourinhos municipality, in the years 1972 and 2014, and the changes occurred between 1972 and 2014. It was used in the classification of the images the software ArcGIS*

10.3 and in the evaluation of the changes the module LCM (Land Change Modeler) of the software Idrisi Taiga. It was verified that there were important transformations in the soil cover of the studied area, influencing, the infiltration rates of rainwater in the soil and the rates of surface runoff. This condition has caused flash flood and floods in the area. After the analyzes, it was verified that the geotechnologies used allowed the necessary activities to be carried out quickly and reliably, allowing the formation of a database containing the characteristics of the area and the places of greatest risk. The generated database can also be used by public managers as a source of information for the development of projects to protect natural resources and the population.

**Keywords:** *geoprocessing, remote sensing, water resources, water, Geographic Information System.*

## I. INTRODUÇÃO

As mudanças no uso da terra intensificadas nos últimos anos, têm criado condições para que episódios extremos de chuvas e secas ocorram com intensidade sempre crescente.

Estas mudanças têm impactado sobremaneira, o ciclo hidrológico, a partir da substituição da cobertura natural de áreas cada vez mais amplas por outros usos, mais intensos, que interferem nas taxas de infiltração da água no solo e conseqüente na capacidade de armazenamento, de escoamento superficial e de enxurradas, e, ainda na ampliação de processos erosivos, de assoreamento, de inundação de áreas de várzeas, e perda de água armazenada no solo. Este contexto, faz com que amplas áreas antropizadas tenham aumentadas as proporções de desastres, não apenas aqueles decorrentes de chuvas e desmoronamentos, mas também de escassez hídrica, tanto para abastecimento humano, quanto para dessedentação de animais e para produção agrícola.

Piroli (2016) informa que a água tem sido mal gerida e mal cuidada em quase todos os lugares do mundo via mudanças e interferências nos seus ciclos, caminhos e estados. O autor diz que como conseqüência, a água, ao tentar se adaptar a estas mudanças, causa estragos e prejuízos às pessoas e suas estruturas, que por desconhecerem ou desconsiderarem suas características, ocupam locais que naturalmente são dela e que ela não pode deixar de usar na sua dinâmica.

Neste contexto, conhecer a dinâmica das águas e as taxas de mudança no uso da terra, bem como quais são as coberturas do solo e as conseqüências do conjunto de mudanças sobre os componentes de um ecossistema é fundamental para o planejamento de sistemas de preservação da vida e de estruturas, bem como de gestão e de manejo dos recursos naturais e das relações sociais e econômicas de uma área.

Estas análises, devem ser realizadas por bacias hidrográficas, sempre que estas puderem ser delimitadas em função das características do relevo regional, pois estas se caracterizam como sistemas abertos, onde vivem as pessoas e onde o ciclo hidrológico desenvolve algumas de suas principais fases, como a precipitação, o escoamento sub e superficial, a infiltração profunda, a recarga dos aquíferos livre e confinados, a evaporação e a evapotranspiração. Também é no espaço de uma bacia hidrográfica que normalmente a população humana vive e desenvolve grande parte ou todas as suas relações sociais e econômicas, ficando por isso, reféns das decisões tomadas pelos gestores e pelos habitantes da área.

As geotecnologias têm importante contribuição a dar para estas análises pois permitem que se possa lançar mão de dados de sensores remotos orbitais e sub orbitais, de aplicativos de computador e de informações obtidas a campo para o levantamento de características de uma área, e processamento do

conjunto de dados visando a contribuição com técnicos que analisam detalhes e geram produtos, cartográficos ou não, para gestores responsáveis pelo manejo adequado dos espaços.

O Sensoriamento Remoto pode ser definido como o processo de aquisição de informações sobre um determinado fenômeno ou componente da superfície terrestre sem haver o contato físico com ele (JENSEN, 2009). Também pode ser considerado “a ciência e a arte de obtenção de informações sobre um objeto, área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por dispositivos que não estão em contato com os mesmos” (LILLESAND et al., 2004). Para Liu (2007) o sensoriamento remoto é definido como a técnica de aquisição e de aplicações das informações sobre um objeto, sem nenhum contato físico com ele. Estas informações são adquiridas a partir da detecção e medição das mudanças que o objeto impõe ao campo eletromagnético.

Já Novo (1992) definiu sensoriamento remoto como sendo a utilização conjunta de modernos equipamentos sensores, equipamentos para processamento dos dados, equipamentos de transmissão, aeronaves, espaçonaves, satélites, etc. com o objetivo de estudar o ambiente terrestre através do registro e das interações entre as radiações eletromagnéticas e as substâncias componentes do planeta Terra em suas mais diversas manifestações.

Rosa (2009) complementa os conceitos anteriores acrescentando que as informações são obtidas utilizando-se a radiação eletromagnética gerada por fontes naturais como o Sol e a Terra, ou por fontes artificiais, como por exemplo, o radar. Assim, afirma que o sensoriamento remoto pode ser entendido como um conjunto de atividades cujo objetivo consiste na caracterização das propriedades físico-químicas de alvos naturais, através da detecção, registro e análise do fluxo de energia radiante por eles refletido e/ou emitido.

Weiers (1999) e Güls (1999), citados por Lang e Blaschke (2009) afirmam que o sensoriamento remoto por satélite possibilita o levantamento de dados sobre mudanças em extensas áreas. Por isso consideram interessante utilizar o potencial deste para o monitoramento regular e intenso. Afirmam que com o uso desta tecnologia é possível determinar áreas que apresentam mudanças relevantes para a proteção ambiental. Assim, o sensoriamento remoto atua como filtro ou como foco.

A partir do início do Século XXI, houve o aumento do número de satélites equipados com sensores de alta resolução espacial, ampliando a gama de produtos disponíveis aos usuários que atuam na área. Como conseqüência, houve a popularização do uso destes produtos, principalmente após a inserção de imagens de alta resolução em aplicativos disponibilizados gratuitamente, via internet.

Para serem usadas na presente pesquisa, as imagens de satélite e as fotografias aéreas foram processadas por meio de

técnicas de geoprocessamento, que de acordo com Fitz (2009), evoluiu a partir dos avanços da informática e dos SIG, tendo se tornado nos últimos anos um instrumento essencial para o desenvolvimento de trabalhos que requerem a espacialização de informações. O autor destaca que produtos de geoprocessamento estão superando em uso os mapas analógicos. Câmara et al. (2004) também afirmaram que o geoprocessamento surgiu a partir dos avanços da tecnologia da informática que tornou possível armazenar e representar informações geográficas em ambiente computacional.

Este tem tido aplicação em diversas áreas do conhecimento, contribuindo para a realização de estudos, sejam de caráter ambiental, social, econômico, entre outros. De acordo com Moreira (2011, p. 202)

[...] o geoprocessamento é um conjunto de tecnologias voltadas à coleta e ao tratamento de informações espaciais para um objeto específico, ou seja, uma informação atrelada a um atributo geográfico. Por isso, tem sido empregado em diversas áreas da ciência, entre elas a cartografia, a geografia, a agricultura e floresta e a geologia.

Para Veiga e Xavier da Silva

O geoprocessamento permite individualizar cada espaço através de suas características ou assinaturas, para que se possa nele atuar mais confiavelmente, além de discernir e explicitar os fenômenos que nele ocorrem, com base em análises mais concretas e rigorosas, minimizando interferências. (VEIGA; XAVIER-DA-SILVA, 2004, p. 189).

Por ter grande eficiência em diagnósticos ambientais, o geoprocessamento apresenta importante potencialidade no que se refere ao monitoramento dos problemas ambientais, permitindo a manipulação de diversos dados e informações e também a representação cartográfica destes. Nascimento et al. (2005) utilizaram o geoprocessamento na identificação de conflito de uso da terra em áreas de preservação permanente na bacia hidrográfica do rio Alegre, Espírito Santo. Na mesma linha, Simões (1996) avaliou as áreas de preservação permanente da bacia do ribeirão Lavapés, em Botucatu-SP, usando o Sistema de Informações Geográficas Idrisi observando que importante percentual estava desprovido de matas ciliares.

Sartori et al. (2009) mapearam as áreas de conflito de uso na bacia experimental do Alto Pardo utilizando imagem orbital do sensor CCD do satélite CBERS-2, e verificaram que mais de 50% da área está sob atividades antrópicas, desenvolvidas em áreas legalmente protegidas pela legislação ambiental.

As mudanças nos usos da terra ocorrem em vários níveis espaciais e em vários períodos de tempo, podendo ser ambientais, naturais, ou antrópicas, dependendo da capacidade tecnológica e econômica de cada sociedade em cada época (CRIADO, 2016). Zanata (2014) ao estudar mudanças no uso da terra em uma bacia hidrográfica, informa que o módulo LCM usa como dados de entrada do modelo dois mapas da paisagem, com datas diferentes (época inicial e final). Diz que a partir destes mapas, os modeladores realizam a estimativa da quantidade de mudanças, com base em cadeias markovianas, resultando em matrizes de transição que originam análise de mudanças e permitem gerar gráficos com balanço de perda e ganhos entre as classes.

Neste contexto, esta pesquisa foi desenvolvida para analisar o uso dos componentes das geotecnologias na avaliação das mudanças no uso da terra da cabeceira da microbacia hidro-

gráfica do córrego do Monjolinho, localizado na área urbana do município de Ourinhos, São Paulo, Brasil, e as consequências destas mudanças no surgimento de desastres naturais na área.

A metodologia utilizada fornece interface abrangendo funções associadas à análise de mudanças, previsão e modelagem de variáveis relativas às transições do ambiente e tem como objetivo auxiliar na tomada de decisão em ações de planejamento, por meio da geração de mapas e tabelas de ganho e perda, detectando mudanças nos mapas de uso da terra de diferentes datas para um mesmo local. A metodologia tem sido usada mundialmente para dar suporte às decisões no planejamento territorial e para a conservação ambiental uma vez que com o uso do LCM se pode visualizar as mudanças na cobertura da terra, simular cenários futuros e modelar os impactos sobre as condições ambientais, espécies animais e vegetais e sua biodiversidade (EASTMAN, 2009).

## II. MÉTODO

Para o desenvolvimento da pesquisa os materiais utilizados foram um aerofotograma de 17/08/1972 na escala de 1:25.000 e uma imagem de satélite de alta resolução disponível no Google Earth de 09 de maio de 2014. Para apoio de campo e da georreferência utilizou-se a carta topográfica do IBGE, folha de Ourinhos (SF-22-Z-A-VI-3) na escala 1:50.000. Foram realizados trabalhos de campo na área apoiados em um aparelho de GPS de navegação para verificações e comprovações das informações visualizadas nas imagens de satélite. Nas análises do uso e cobertura da terra usou-se o sistema de informações geográficas Idrisi Taiga que também foi utilizado para a avaliação das mudanças de uso da terra entre as duas épocas aplicando-se o módulo LCM (Land Change modeler), de acordo com o preconizado por Piroli et al (2011). O trabalho foi desenvolvido a partir da conversão do aerofotograma de analógico para digital e do ajuste no georreferenciamento da imagem, utilizando-se coordenadas extraídas das cartas topográficas da área. Em seguida, o limite da microbacia foi vetorizado sobre a carta topográfica digital georreferenciada.

Na sequência os mapas de uso da terra foram elaborados usando-se técnicas de fotointerpretação para o aerofotograma de 1972 e de interpretação visual da cobertura da terra para a imagem do satélite. Posteriormente os mapas dos dois anos analisados foram inseridos no módulo Land Change Modeler do Idrisi Taiga para a geração dos mapas de mudanças na cobertura, de ganho de cada categoria de uso, de perda e de persistência das classes de uso da terra entre os anos estudados.

As categorias de uso e cobertura em que as classes identificadas foram inseridas são definidas pelo IBGE (2013), e foram adotadas em função das características predominantes na área de estudo, sendo elas: construções, ruas não pavimentadas, expansão urbana, arborização urbana, ruas pavimentadas e estruturas esportivas.

O tipo de solo predominante na área de estudo é o Latossolo (EMBRAPA, 1999), constituído por material mineral, com horizonte B Latossólico imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte (OLIVEIRA, 1999). Os latossolos apresentam perfis espessos, com mais de 3 metros de profundidade e de coloração avermelhada. Sua textura varia de argilosa a média e são, em geral, solos com boas propriedades físicas, de excepcional porosidade total com valores que podem chegar a 50-60 %. Por isso, tem boa drenagem interna, mesmo naqueles com textura argilosa (LEPSCH, 2002). Diversos fatores condicionam o movimento de água no solo e a infiltração. Os autores Araújo Filho e Ribeiro (1996), destacaram a umida-

de inicial, Perroux e White (1988), a porosidade, Sales et al. (1999), a densidade do solo, Roth et al. (1985) a cobertura do solo, Bertoni e Lombardi Neto (1990), a textura e o grau de agregação do solo; e Reichert et al. (1992), o selamento superficial. A declividade predominante na área de estudo gira em torno de 12%.

### III. RESULTADOS

Ao avaliar as mudanças relativas ao uso e à cobertura entre 1972 e 2014, verifica-se que em 1972, a cobertura da terra era predominantemente composta pela expansão urbana, com 21,03 hectares, além das ruas não pavimentadas que cobriam 4,85 hectares. Já em 2014 as categorias predominantes eram as construções, que ocupavam 16,09 ha, e as ruas pavimentadas que ocupavam 8,34 ha. A Tabela 1 apresenta o resultado obtido após a classificação do uso da terra nos anos de 1972 e 2014 em área (ha) e em porcentagem (%).

**TABELA 1**

Área total ocupada por cada uso da terra e respectiva porcentagem.

USO DA TERRA	1972 (HA)	% 1972	2014 (HA)	% 2014
Construções	3,61	11,02	16,09	49,13
Ruas não pavimentadas	4,85	14,81	0,32	0,98
Expansão urbana	21,02	64,19	4,33	13,22
Arborização urbana	3,27	9,98	3,33	10,17
Ruas pavimentadas	0,0	0,0	8,34	25,46
Estruturas esportivas	0,0	0,0	0,34	1,04
<b>TOTAL</b>	<b>32,75</b>	<b>100</b>	<b>32,75</b>	<b>100</b>

A Figura 1 mostra o recorte da área de estudo no ano de 1972, onde é possível observar que somente nas porções nordeste e oeste da microbacia haviam pequenos adensamentos de casas. No restante da microbacia predominava o solo coberto com gramíneas, livre de construções. Também já era possível visualizar o traçado das ruas, que ainda eram todas de chão batido.

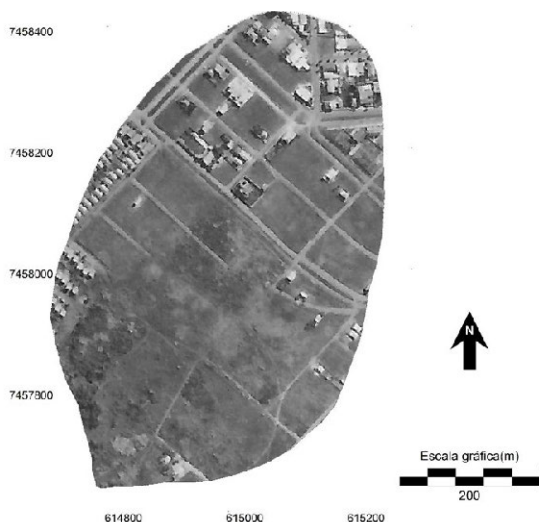


Figura 1 - Recorte da área estudada no ano de 1972.

A Figura 2 apresenta o recorte da área de estudo no ano de 2014, onde se pode verificar que as estruturas urbanas ocuparam praticamente toda a microbacia. Em trabalhos de campo foi verificado que além das construções terem ocupado amplas áreas, ainda são circundadas por pisos e concretos, tornando cada terreno um local completamente impermeável, o que traz como consequência o impedimento de qualquer infil-

tração de água das chuvas e o escoamento da quase totalidade das águas precipitadas.

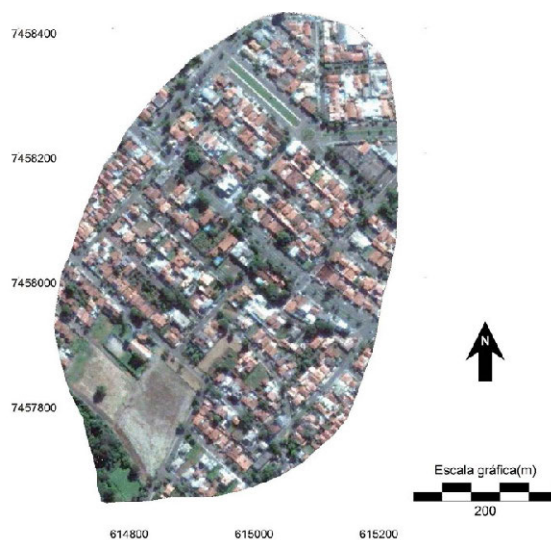


Figura 2 - Recorte da área estudada em 2014.

Posteriormente, os usos da terra dos dois anos avaliados foram classificados com o objetivo de facilitar as análises quantitativas e de permitir a visualização da distribuição das categorias de uso na microbacia. O resultado deste procedimento é apresentado na Figura 3 para o ano de 1972 e na Figura 4 para o ano de 2014.



Figura 3 - Mapa de uso da terra classificado no ano de 1972.

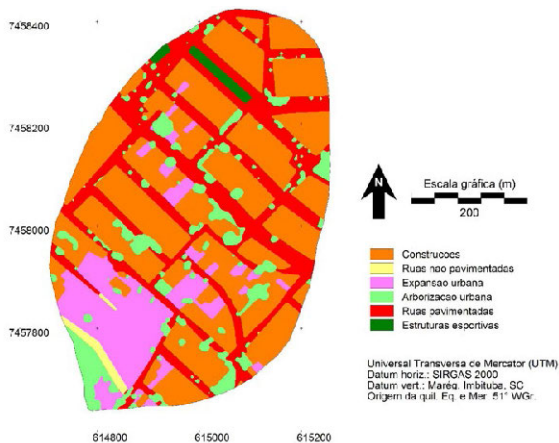


Figura 4 - Mapa de uso da terra classificado no ano de 2014.

As duas figuras demonstram o grau de ampliação do número de casas e demais estruturas construídas, bem como indicam o aumento das taxas de impermeabilização do solo. Pode-se verificar que no segundo ano analisado foi implantada estrutura esportiva de caminhadas e corridas ao noroeste da área, onde a população de Ourinhos pratica estes esportes.

A Figura 5 apresenta o resultado da aplicação do módulo LCM contido no Idrisi Taiga. Nela se verifica que houveram grandes transformações no uso da terra da microbacia (26,75 hectares ou 81,7%), em praticamente toda sua área. As únicas regiões que não sofreram mudanças foram aquelas com áreas construídas e a área localizada ao sul da microbacia onde a vegetação de gramíneas se manteve nas duas épocas avaliadas.

Esta constatação corrobora o exposto por Sampaio et al. (2014) que verificaram que as áreas urbanas estão entre as que mais sofrem alterações de padrão de cobertura do solo. Os autores afirmam que em função disso, estas devem receber atenção quanto à aplicação de modelagem espacial. Neste processo de modelagem, Veldkamp e Verburg (2004) apontam ser importante a compreensão da dinâmica da cobertura da terra nas áreas urbanas e a sua interação com as variáveis físicas, biológicas, econômicas e sociais da área estudada.

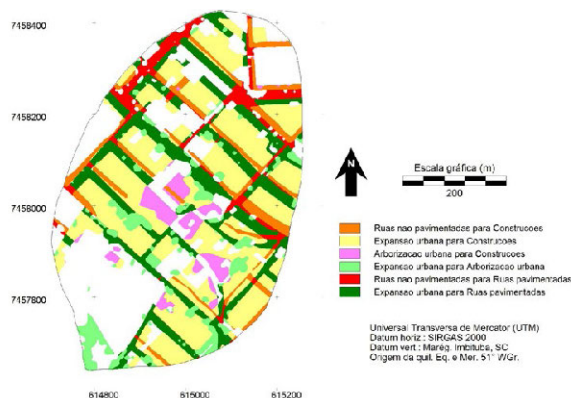


Figura 5 - Mudanças no uso da terra na área de estudo.

As análises apresentadas explicam as causas de alguns dos problemas ocorridos nos últimos anos na área estudada. Como exemplo, relata-se que no dia 25 de setembro de 2014 após uma chuva de aproximadamente 100 milímetros uma senhora foi arrastada pela água acumulada na superfície, enquanto realizava suas tarefas rotineiras dentro de casa.

Este episódio demonstra que o avanço das áreas impermeáveis sobre espaços que anteriormente permitiam infiltração de parte da água das chuvas, o que reduzia o escoamento superficial, influencia diretamente na concentração da água sobre o solo e no seu potencial destruidor. Na área de estudo, a cobertura do solo na década de 1970 era também mais rugosa, retendo por mais tempo a água que se concentrava na superfície (PIROLI, 2016). O mesmo autor diz que

à medida que ruas foram sendo asfaltadas e casas foram substituindo os espaços cobertos pela vegetação de gramíneas e arbustiva ocorrentes na época, a textura da superfície foi se tornando mais lisa, permitindo o escoamento mais rápido da água, fazendo com que a mesma se concentrasse em determinados pontos em velocidade maior do que aquela alcançada nas décadas anteriores (PIROLI, 2016).

A Figura 6 mostra o resultado da concentração da água na superfície da microbacia, no seu baixo curso.

Pirolí (2016) utilizando geotecnologias, representou com valores aproximados a quantidade de água que chegou à casa da moradora no momento em que ela foi arrastada. Considerando a área da microbacia que é de 32,7 hectares, ou 327.000 metros quadrados e a precipitação ocorrida imediatamente antes do episódio, que foi de em torno de 100 milímetros por aproximadamente uma hora, de acordo com dados de estações pluviométricas localizadas na região de Ourinhos. E, considerando-se ainda que não houve infiltração e tampouco evaporação, pois as chuvas ocorreram no início da noite, praticamente toda água precipitada, escoou superficialmente.



Figura 6 - Solo preparado, carregado pela água.

Assim, o autor considerando que na chuva de 100 milímetros caíram 100 litros de água por metro quadrado, verificou que na área da microbacia precipitaram 32.700.000 (trinta e dois milhões e setecentos mil litros de água), ou 32.700 metros cúbicos em um período de tempo muito curto (uma hora). Este volume, concentrado na superfície, adquiriu grande energia conseguindo arrastar a casa.

Este resultado confirma o exposto por Schueller (1987) que diz que em áreas urbanizadas o balanço hídrico é modificado, aumentando o escoamento superficial enquanto que o sub-superficial e o subterrâneo são reduzidos.

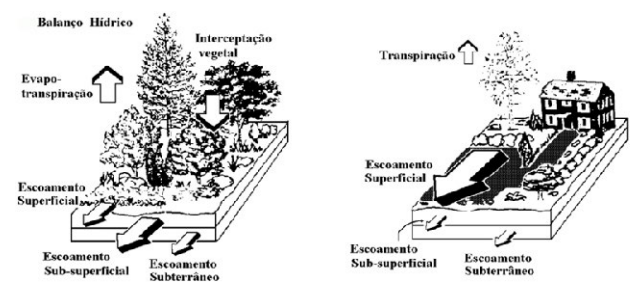


Figura 7 - Balanço hídrico em área natural e em área urbana.

A Figura 7 mostra ainda que os processos de interceptação vegetal e de evapotranspiração ficam prejudicados quando da substituição da cobertura natural pela antrópica, principalmente se esta não for adequadamente planejada.

#### IV. CONCLUSÕES

Após as análises e avaliações realizadas nesta pesquisa, é possível afirmar que as geotecnologias auxiliaram sobremaneira no estudo da área e na compreensão dos processos nela ocorrentes.

A partir da metodologia utilizada foi possível compreender as transformações ocorridas no uso da terra e as consequências destas mudanças no ciclo hidrológico. Além disso, levam

tou-se dados que permitiram a compreensão da dimensão dos desastres naturais que tem se intensificado na área da pesquisa e nas circunvizinhanças.

O módulo LCM presente no Sistema de Informações Geográficas Idrisi Taiga permitiu a análise automática das mudanças ocorridas na área fornecendo respostas aos questionamentos existentes na comunidade relativos ao que mudou para que as tragédias surgissem e comprometessem patrimônios e vidas.

O recorte espacial microbacia hidrográfica urbana demonstrou-se adequado para o estudo, permitindo que fossem detectadas as transformações no uso da terra e os impactos delas decorrentes. Isso comprova que esta unidade espacial é indicada para o planejamento e o manejo dos recursos naturais em cidades por ser delimitada pela natureza, e por favorecer assim, a integração de dados e informações acerca do espaço em análise.

## REFERÊNCIAS

- ARAÚJO FILHO, J.C.; RIBEIRO, M.R. Infiltração de água em Cambissolos do Baixo Irecê (Ba). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Piracicaba, v.20, p.263-370, 1996.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. *Conservação do Solo*. São Paulo: Ícone, 1990. 355p.
- CÂMARA, G., DAVIS, C., CASANOVA, M. A., QUEIROZ, G. R. D. (Eds.) *Banco de dados geográficos*. Curitiba: Editora MundoGEO, 2005.
- CRIADO, R.C. *Mudanças no uso e na cobertura da terra em municípios do Pontal do Paranapanema de 1984 a 2014*. Tese de Doutorado. Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Presidente Prudente, 2016.
- EMBRAPA. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 1999. 412 p.
- FITZ, P. R. *Geoprocessamento sem complicação*. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Manuais Técnicos em Geociências, número 7 - Manual técnico de uso da terra*. 3. Ed. Rio de Janeiro, 2013.
- JENSEN, J. R. *Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres*. Tradução: EPIPHANIO, J.C.N. (coordenador)...[et al.]. São José dos Campos: Parêntese, 2009.
- LANG, S., BLASCHKE, T. *Análise da paisagem com SIG*. Tradução Hemann Kux. São Paulo: Oficina de Textos, 2009.
- LEPSCH, I. F. *Formação e conservação do solo*. São Paulo: Oficina de Textos, 2002. 178p.
- LILLESAND, T. M., KIEFER, R. W., CHIPMAN, J. W. *Remote sensing and image interpretation*. 5. ed. Hoboken: Wiley, 2004.
- LIU, W. T. H. *Aplicações de sensoriamento remoto*. Campo Grande: Ed. Uniderp, 2006.
- MOREIRA, M. A. *Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação*. 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 2011.
- NASCIMENTO, M. C., SOARES, V. P., RIBEIRO, C. A. A. S., SILVA, E. *Uso do geoprocessamento na identificação de conflito de uso da terra em áreas de preservação permanente na bacia hidrográfica do rio Alegre, Espírito Santo*. *Ciência Florestal*, v.15, n.2, p.207-220, 2005.
- NOVO, E. M. L. *Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações*. São Paulo: Edgard Blucher, 1992.
- OLIVEIRA, J. B. et al. *Mapa pedológico do estado de São Paulo: legenda expandida*. Campinas: EMBRAPA, 1999. 64 p.
- PERROUX, K. M.; WHITE, I. *Designs for disc permeameters*. *Soil Science Society of America Journal*. v.52, p.1205-1215, 1988.
- PIROLI, E. L.; ISHIKAWA, D. T. K.; DEMARCHI, J. C. *Análise das mudanças no uso do solo da microbacia do córrego das Furnas, município de Ourinhos - SP, entre os anos de 1972 e 2007, e dos impactos sobre suas áreas de preservação permanente, apoiada em geoprocessamento*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2011.
- PIROLI, E.L. *Água: por uma nova relação*. Jundiaí: Paco Editorial, 2016.
- REICHERT, J.M.; VEIGA, M. & CABEDA, M.S.V. *Selamento superficial e infiltração de água em solos do Rio Grande do Sul*. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v.16, p.289-298. 1992.
- ROSA, R. *Introdução ao sensoriamento remoto*. 7ª edição. Uberlândia: UFU, 2009.
- ROTH, C.H.; MEYER, B.; FREDE, H.G. *A portable rainfall simulator for studying factors affecting runoff, infiltration and soil loss*. *Catena*, v.12, p.79-85, 1985.
- SALES, L.E.O.; FERREIRA, M.M.; SILVA DE OLIVEIRA, M.; CURI, N. *Estimativa da velocidade de infiltração básica do solo*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. Brasília, v.34, n.11, p.2091-2095, 1999.
- SAMPAIO, D.M., ELMIRO, M.A.T., NÓBREGA, R.A.A. *Modelagem da dinâmica da expansão urbana no Vetor Norte da Região Metropolitana de Belo Horizonte e análises sobre as novas infraestruturas viárias previstas até 2031*. *Geografias*, Belo Horizonte, v. 10, n. 2, p. 78-99, 2014.
- SARTORI, A. A. da C., BARBOSA, A. P., PISANI, R. J., OLIVEIRA, F. G., ZIMBACK, C. R. L. *Mapeamento de conflitos de solo em áreas de preservação permanente na Bacia Experimental do Rio Pardo - São Paulo - Brasil*. In: *Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, 14, 2009. Natal. *Anais...* São José dos Campos: INPE, 2009. p. 2809-2816.
- SCHUELLER, T. *Controlling Urban Runoff: A Practical Manual for Planning and Designing Urban BMPs*. 1987, apud CAMPO GRANDE. *Plano Diretor de Drenagem Urbana. Relatório R10*, 2008.
- SIMÕES, L. B. *Avaliação das áreas de preservação permanente da bacia do ribeirão Lavapés, Botucatu, São Paulo, através de sistema de informação geográfica (SIG-IDRISI)*. Botucatu, 1996. *Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista*, 144p.
- VELDKAMP, T. A.; VERBURG, P. H. *Modelling land use change and environmental impact*. *Journal of Environmental Management*, n. 72, p. 1-3, 2004.
- ZANATA, J. M. *Mudanças no uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do Ribeirão Bonito, municípios de Avaré e Itatinga - SP*. *Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista, Programa de Pós-Graduação em Geografia*. Presidente Prudente, 2014.



# Identificación de la importancia de las características de bosques de polylepis para la comunidad de aves: un enfoque de red a escala de paisaje

Pedro X Astudillo<sup>1\*</sup>, Ingo Grass<sup>2</sup>, Nina Farwing<sup>3</sup>

1 Universidad del Azuay, Escuela de Biología, Ecología y Gestión, Av. 24 de Mayo 7-77 Cuenca, Ecuador. [pastudillow@uazuay.edu.ec](mailto:pastudillow@uazuay.edu.ec)

2 Department of Crop Sciences - Agroecology, Georg-August-Universität Göttingen, Göttingen, Germany. [ingo.grass@agr.uni-goettingen.de](mailto:ingo.grass@agr.uni-goettingen.de)

3 Department of Ecology - Conservation Ecology, Faculty of Biology, Philipps-Universität Marburg, Marburg, Germany. [mail@ninafarwig.de](mailto:mail@ninafarwig.de)

## RESUMEN

En un mundo cada vez más modificado por actividades humanas, un mejor conocimiento de las asociaciones entre remanentes de hábitat y las especies que los ocupan en el mosaico del paisaje se torna cada vez más importante. Hasta ahora, y en especial en los trópicos, estas asociaciones han sido investigadas mayoritariamente a través de tendencias lineales, en fragmentos o localidades aisladas y mediante fragmento - por fragmento. Inclusive, organismos altamente móviles, tales como las aves, a menudo usan paisajes fragmentados permitiendo así conectar varios parches a la vez, como resultado se produce una relación entre aves y fragmentos dentro en un contexto de red espacial. En consecuencia, se ha estudiado la estructura de la red espacial, compuesta por parches de bosque de Polylepis y la comunidad de aves, clasificada en tres gremios de afinidad de hábitat (i.e., especialistas de bosque; especialistas de páramo y generalistas) en el paisaje fragmentado de los altoandinos, sur de Ecuador. Para el efecto, se usaron índices de centralidad (i.e., aproximación de la diversidad de aves contenida en un parche dentro del contexto de red) en fragmentos de Polylepis como una medida de la importancia relativa de cada fragmento para los gremios de aves. Los índices de centralidad varían considerablemente dependiendo del gremio de aves como así también de la estructura del fragmento. Así, para las aves especialistas de bosque de Polylepis, la centralidad decrece con áreas mayores y formas más irregulares de los parches, aunque incrementa a mayor elevación. En contraste, la centralidad para las aves generalistas incrementa con áreas mayores y formas más irregulares de los fragmentos, pero no hay efecto asociado con la elevación. Además, la influencia del páramo que rodea los parches de Polylepis reduce la centralidad de las aves especialistas de bosque de Polylepis y de las generalistas. Finalmente, la centralidad para las aves especialistas de páramo no estuvo asociada con las características de los fragmentos. En conclusión, la importancia de los parches para las aves especialistas de bosque de Polylepis radica en la calidad de los mismos más que en la cantidad; mientras que aves generalistas dependen de parches de Polylepis grandes y responden positivamente a formas irregulares (i.e., mayor efecto de borde). El concepto de red espacial utilizado facilita identificar aquellos parches que son cruciales para toda la estructura, asociación de hábitat de la comunidad de aves. Por tal razón, el enfoque de red espacial es una técnica prometedora para alcanzar planes exitosos de conservación a escala de paisaje.

Palabras clave: **centralidad de parche, teoría de red, paisaje de páramo, Parque Nacional Cajas.**

#### **ABSTRACT**

In an increasingly human-modified world, a better understanding of associations between fragmented habitats and species in mosaic landscapes becomes increasingly important. So far, these associations have been mostly investigated based on correlations and in an isolated, patch-by-patch manner. Yet, mobile taxa often use and connect multiple habitat patches, resulting in habitat-species networks. Here, we studied networks composed of *Polylepis* forest patches and three habitat guilds of birds (i.e., *Polylepis* specialists, páramo specialists, and generalist birds) in the high-altitude Andes of Ecuador. We used the centrality of *Polylepis* patches within these networks as a measure of their relative importance for birds within a given guild (i.e., approach of bird diversity harbors in a patch within network context). Patch centrality differed considerably depending on guilds and patch characteristics. For *Polylepis* specialists, patch centrality decreased with larger and more irregular shaped patches, but increased with higher elevation. In contrast, patch centrality for generalist birds was positively related to patch area and shape irregularity, but not to patch elevation. Increasing influence of the surrounding páramo vegetation reduced the patch centrality for both *Polylepis* specialists and generalist birds. Patch centrality for páramo specialists was not related to the recorded patch characteristics. In conclusion, the importance of forest patches for *Polylepis* specialists in our study area is driven by characteristics related to the quality but not the quantity of available habitat, whereas forest generalists depend on larger *Polylepis* patches and positively respond to edge effects. A network approach facilitates identifying those patches that are crucial contributors to the overall structure of the habitat-species network on a landscape scale. Thus, network theory is a promising tool to aid conservation and landscape planning in mosaic landscapes.

Keywords: **patch centrality, network theory, páramo landscape, Cajas National Park.**

## **I. INTRODUCCIÓN**

La continua fragmentación y creciente modificación de los ecosistemas confina a la biodiversidad hacia paisajes modificados por los humanos (Foley et al, 2005; Laurance et al, 2013). Un mejor entendimiento de los patrones de la biodiversidad en estos paisajes modificados es crucial para su conservación (Gardner et al, 2009). En paisajes boscosos, las aves son consideradas como importantes indicadores de la salud de los fragmentos, debido a que su distribución y composición de la comunidad está fuertemente relacionada con la cantidad (eg., área de parche) y la calidad (eg., composición vegetal) de cada uno de los parches de bosque que ocupan (Moonen & Barberi 2008). En adición, las aves son componentes esenciales para el funcionamiento de los ecosistemas, como son la polinización, dispersión de semillas o control de plagas (Sekercioglu 2006).

La mayoría de estudios investigan el rol de la calidad y cantidad de los parches de bosque, correlacionando las características del parche con medidas de la diversidad de aves (Neuschulz et al, 2011; Berens et al, 2014). Así, estas correlaciones están investigando fenómenos de manera aislada, es decir, evaluaciones parche por parche; sin embargo, este enfoque podría ser limitado debido a que no considera a los parches de bosque y las aves dentro del paisaje entero, reduciendo de esta manera la aplicación de planes de conservación efectivos. En especial, las aves de bosque pueden percibir el paisaje fragmentado como una red espacial conectada, ya que son especies móviles y en consecuencia pueden usar varios parches, temporalmente o permanentemente, para anidar, forrajear o simplemente como hábitat de paso para moverse a través del paisaje (Verboom et al, 2001; Neuschulz et al, 2013). En consecuencia, una aproximación de red espacial puede mejorar el entendimiento sobre cómo la comunidad de aves dependen de los parches de bosque en todo el mosaico del paisaje.

Actualmente, los índices de centralidad han venido ganando en popularidad para identificar nodos específicos como importantes conectores dentro de una red (Girvan & Newman 2002; Jordán et al, 2007). Por ejemplo, los algoritmos GoogleTM's PageRankTM han sido construidos en base de medidas de centralidad para asegurar la identificación de páginas web, que están asignadas en niveles de mayor prioridad, dentro de las búsquedas en la web (Bryan & Leise 2006). Dentro del contexto de redes espaciales, las redes primates-parásitos han usado índices de centralidad para identificar vías emergentes de enfermedades para humanos (Gómez et al, 2013). En redes, compuestas por aves dispersoras de semillas (conectores) y árboles frutales (nodos), los índices de centralidad han podido identificar que la distribución espacial, la abundancia y la identidad taxonómica de los árboles frutales como importantes variables para la conectividad del paisaje (Rodríguez-Pérez et al, 2014).

Dentro del contexto de conectividad en el mosaico del paisaje, los parches de bosque y las especies de aves están directamente conectados (i.e., cuando una o más especies ocupan un parche determinado) o indirectamente conectados (i.e., cuando dos o más parches se conectan a través de una o más especies que se comparten a través de estos parches). El resultado de esta relación parche-especies es una red espacial, compuesta desde su interior por la diversidad de aves, y hacia la periferia, por los parches de bosque. En este punto, es imperante considerar que las medidas de centralidad pueden ser usadas para identificar aquellos parches que son nodos cruciales de toda la estructura de la red espacial, integrada por la relación parche-aves, y en consecuencia obtener una visión de la conectividad del paisaje. En adición, las medidas de centralidad de los parches de bosque dependen, en buena medida, de la afinidad de hábitat de las especies de aves y su respuesta a la cantidad y calidad del hábitat. Asignando a las

especies de aves dentro de diferentes gremios de preferencia de hábitat (eg., especialistas de bosque, generalistas y especialistas de pastizales; Grass et al, 2014) se puede mejorar el conocimiento de las asociaciones parche-aves.

En los altoandinos de Suramérica, los bosques de *Polylepis* (Rosaceae) ocurren en un mosaico de paisajes que consiste en varios parches de *Polylepis* intersectados por páramo herbáceo. Los bosques de *Polylepis* son un ecotipo naturalmente distribuido en fragmentos; sin embargo, su actual distribución está modificada y amenazada por actividades humanas tales como quemadas para promover pastoreo, deforestación y tala para la colección de leña (Purcell & Brelsford 2004; Garcia et al, 2010). Al mismo tiempo, los bosques de *Polylepis* son un hábitat crucial para la conservación de especies de aves globalmente amenazadas (Benham et al, 2011). Dentro de este marco, la configuración del paisaje, la constante amenaza humana, y la importancia para la conservación de aves hace de los bosques de *Polylepis* un modelo ideal para estudiar las asociaciones parche-aves, y así entender cómo las comunidades de aves dependen de las características de los parches en el paisaje fragmento dentro del contexto de red espacial.

En el presente estudio, se usó las características de los parches de *Polylepis* (i.e., área, forma y composición del hábitat) para explicar su importancia relativa para las aves agrupadas en tres diferentes gremios de preferencia de hábitat (especialista de bosque de *Polylepis*, generalistas y especialistas de páramo), en el paisaje alto-Andino, sur del Ecuador. Así, se aplicó el enfoque de red espacial basado en la diversidad de aves de cada gremio registrada a través de los parches de *Polylepis* y, aplicando índices de centralidad de cada parche para estimar la importancia relativa en la conectividad de la comunidad de aves.

## II. MÉTODOS

### ÁREA DE ESTUDIO

El trabajo de campo se realizó en el Parque Nacional Cajas en los altoandinos al suroccidente de Ecuador (2°51'S, 79°11'O). El área protegida cubre un área de 28 544 ha, con rangos de elevación de 3160-4445 m (Delgado et al, 2006). La precipitación anual de la región fue de 1200 mm con temperaturas diarias que fluctúan de 0-20°C (IERSE 2004). La vegetación del parque consiste en ~90% de páramo herbáceo el cual atraviesa >1000 parches de bosque de *Polylepis*; los parches varían en tamaño (<1.0-44h ha) y forma en todo el paisaje de páramo (Minga & Verdugo 2007).

Cada parche de *Polylepis* es considerado como una formación de bosque continua separada al menos de 150 m del parche más cercano. Así, se seleccionaron 15 parches de *Polylepis*. La distancia de los 15 parches seleccionados al parche más cercano de la región varía entre 154-707 m (media= 347 m ± SD 195 m). Mientras, la distancia entre dos parches seleccionados, a través de todos los 15 parches de estudio, varía entre 314-17 192 m (6510 m ± 5165 m). El área de los parches de estudio varía entre 1.65-17.63 ha (7.25 ha ± 5.16 ha). En adición al área, se calculó el perímetro de cada parche y se usó esta información para calcular un índice de forma, el cual incrementa mientras la forma del parche se aleja del círculo perfecto [1]:

$$Forma = \frac{P}{2\sqrt{\pi A}} \quad (1)$$

donde P representa el perímetro (m) de un parche dado y, A (m<sup>2</sup>) es el área de dicho parche. El índice tiene un valor de 1

cuando el parche muestra una forma circular e incrementa mientras la forma se vuelve más irregular. Sin embargo, el índice de forma estuvo correlacionado significativamente con el área ( $r = 0.85$ ,  $P < 0.001$ ). Así, para obtener un índice de forma independiente del área, se usó una regresión lineal usando al área como variable explicativa y al índice de forma como variable dependiente, seguidamente se usó los residuos estandarizados del modelo para referirse como 'índice de forma de cada parche'.

### Censo de aves

Dentro de cada parche de *Polylepis*, se instalaron cuatro puntos de conteo los cuales estuvieron separados al menos a 100 m entre sí, para evitar doble conteos. En cada punto de conteo, se registró todas las aves vistas y/o escuchadas dentro de un radio de 25 m con una duración de 15 min de observación; las aves que sobrevolaron el punto de conteo no fueron registradas. El censo de aves se realizó con tres repeticiones temporales desde Agosto 2012 - Abril 2013 y otras tres repeticiones durante Agosto 2013 - Abril 2014. Las especies fueron identificadas siguiendo las guías de campo de Ridgely & Greenfield (2001) y Tinoco & Astudillo (2007). Una vez que las especies fueron identificadas, estas fueron asignadas a uno de los tres gremios de preferencia de hábitats (Astudillo et al, 2015): 1) especialistas de bosques de *Polylepis* que prefieren dichos bosques; 2) generalistas que hacen uso de los bosques de *Polylepis* como de la matriz de páramo; y 3) especialistas de páramo que solamente ocurren en los hábitats de páramo.

### Estructura y composición del hábitat

En cada punto de conteo se estableció una parcela circular de 12 m de radio. Desde el centro de la parcela se instalaron cuatro transectos de 12 m de largo distribuidos en función de los cuatro puntos cardinales; se contó e identificó todas las plantas leñosas con un diámetro a la altura del pecho (DAP) < 3 cm, que fueron contadas por un observador que caminaba con los brazos abiertos a lo largo de los transectos. En toda el área de la parcela circular se contó e identificó todos los árboles y arbustos con un DAP ≥ 3 cm. La diversidad vegetal de cada parche fue calculada a través del índice de equidad de Shannon, basado en los conteos de todos los árboles y arbustos. Además, se estimó la cobertura del dosel en cinco clases por cada 3 m a lo largo de cada transecto (12 medidas por parcela; 0= 0-19%; 1= 20-39%; 2= 40-59%; 3= 60-79%; 4= 80-100%) y posteriormente se promedió estos valores para obtener un valor de cobertura de dosel por parche. En los mismos puntos de cobertura de dosel, se estimó el perfil de la vegetación usando un poste de 3 m de alto, el cual estaba marcado con intervalos de 0.5 m en donde cada intervalo fue registrado cuando hacía contacto o no con cualquier estructura vegetal; después de los 3 m el perfil de la vegetación se estimó visualmente con intervalos de 1 m. En base a esta información se calculó un índice de complejidad vertical de la vegetación basado en Shannon, usando el número de toques de la vegetación por cada intervalo dentro de cada parcela circular, se promediaron los valores para obtener un índice para cada parche.

Los parches de *Polylepis* pueden diferir considerablemente en función de la composición vegetal. Para controlar esta variación se estimó la proporción de tres tipos de vegetación por cada parcela circular: 1) plantas del género *Polylepis*, que son restringidas a los bosques e incluyen las especies *Polylepis reticulata* y *Polylepis incana*; 2) plantas leñosas nativas de páramo, las cuales están distribuidas usualmente en el páramo incluye los géneros *Hesperomeles* (Rosaceae), *Chuiriraga* y *Diplostephium* (Asteraceae); y 3) plantas leñosas cosmopoliti-

tas, especies vegetales nativas que ocurren tanto en bosque de *Polylepis* como en el páramo, incluye los géneros *Gynoxis* (Asteraceae), *Brachyotum* and *Miconia* (Melastomataceae). Para más detalles de las condiciones de los bosques de *Polylepis* referirse al Anexo 1.

Para reducir la variabilidad subyacente de todas las características de cada parche se desarrolló un análisis de componentes principales (PCA por sus siglas en inglés). El PCA estuvo basado en una matriz de correlación compuesta por los sitios de estudio y las características de hábitat de cada parche. Para retener los componentes principales (PC) se usó el método broken-stick (Jackson 1993). Así se seleccionó los dos primeros componentes del PCA (64,8% de la varianza total explicada). El primer componente (PCI = 39,6%) refleja un cambio desde un menor perfil de vegetación, menor cobertura de dosel hacia un incremento en el número de arbustos con una mayor proporción de plantas nativas de páramo. El segundo componente (PCII = 28,8%) refleja un cambio desde una mayor complejidad del perfil de la vegetación y un incremento en la proporción de planta cosmopolitas (TABLA I). De este modo se considera la PCI como una vegetación influenciada por la matriz de páramo, mientras que PCII representa un cambio hacia una vegetación más heterogénea y más desarrollada verticalmente con influencia de plantas de páramo y propias de los parches de *Polylepis*.

#### *Análisis estadísticos y de red espacial*

Por cada gremio de afinidad de hábitat de las aves, se construyó una red bipartita compuesta por la asociación parche-especies. Estas redes son topológicamente similares a otras redes ecológicas. Sin embargo, en lugar de usar interacciones entre grupos tróficos, se usó la abundancia de cada especie de ave obtenida en cada parche como información homologa a la frecuencia de interacción. En consecuencia, las redes espaciales que se usaron no miden el nivel de interacción de un cierto grupo de aves con un específico parche de bosque (eg., interacción plantas frutales-dispersores de semillas, flores-polinizadores, o movimientos entre parches). En su lugar representan una visión topológica sobre la contribución de cada parche a la estructura regional de la diversidad de aves por cada gremio de afinidad de hábitat.

**TABLA I.**  
CARGA FACTORIAL, DERIVADA DEL ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES (PCA) DE LAS CARACTERÍSTICAS DE HÁBITAT DE LOS 15 PARCHES DE POLYLEPIS, ALTOANDINOS, SUR DEL ECUADOR.

VARIABLES	PCI (39,6 %)	PCII (28,8 %)
Diversidad de plantas	0,270	-0,241
Perfil de la vegetación	-0,286	0,471
Cobertura de dosel	-0,398	0,160
Promedio de árboles y arbustos	0,445	0,270
Plantas nativas de páramo (%)	0,552	-0,040
Plantas cosmopolitas (%)	-0,036	0,652
Árboles de <i>Polylepis</i> (%)	-0,429	-0,442

Esta red bipartita construida fue convertida en una red unipartita cuantitativa, aquí los parches de *Polylepis* están conectados entre sí mediante la diversidad de especies que comparten, usando la abundancia de las especies como pesos. Para evaluar la importancia de cada parche en la red (i.e., nodos) por cada gremio de preferencia de hábitat de las aves se calculó cuatro índices de centralidad: 1) centralidad cualitativa, es decir, la riqueza de especies compartida a través de los parches; 2) grado de Opshal, es decir una centralidad

cuantitativa que mide la frecuencia de interacción entre fragmentos basado en la abundancia de individuos por especie; 3) centralidad de distancia, es decir, que mide los patrones de recambio de diversidad de especies a través de toda la red; 4) vector centralidad, es decir, que mide la magnitud de dicho recambio, esta magnitud incrementa mientras más fragmentos comparten la diversidad con un determinado fragmento y vice versa (Gómez et al, 2013).

En base a estos cuatro índices de centralidad se calculó un índice compuesto para evitar la redundancia de información (Gómez et al, 2013). Así, se calculó un PCA basado en una matriz de correlación entre los cuatro índices de centralidad (por cada gremio de preferencia de hábitat de las aves) y los parches; se retuvo el primer componente (todas las varianzas explicadas de cada gremio de hábitat  $\geq$  67,5%) del PCA como índice integral de centralidad. Al evaluar el desempeño del índice integral de centralidad, este se correlacionaba fuertemente, aunque de manera negativa, con los cuatro índices de centralidad iniciales; esto implica que mientras el índice integral incrementa refleja una pérdida de centralidad de todos los gremios de preferencia de hábitat de las aves en la red espacial. Para una interpretación más fácil e intuitiva se multiplicó por -1 al índice integral de centralidad; para representar positivamente la centralidad de los parches en la red espacial. En otras palabras, a mayor índice integral de centralidad mayor conectividad espacial de la red. Los valores del índice varían entre 0-1. En adelante se referirá al índice integral de centralidad como 'centralidad de parche'.

La conectividad de la red espacial (centralidad de parche) fue evaluada mediante modelos lineales de regresión múltiple (LMs). El índice de centralidad del parche por cada gremio de preferencia de hábitat, fue usado como variable dependiente y relacionado con el área del parche, el índice de forma del parche, la elevación, la influencia del páramo en el parche (PCI de la estructura y composición del hábitat) y la heterogeneidad del parche (PCII de la estructura y composición del hábitat) como variables independientes. Sin embargo, al inspeccionar los residuos de la regresión, se encontró autocorrelación espacial en clases discretas de 1500 m (Anexo 2), violando los supuestos de independencia de los residuos. Por tal motivo, se usaron modelos espaciales simultáneos autorregresivos (SARs), estos modelos incorporan información espacial (latitud y longitud) de cada uno de los parches. Dado que los SARs son generalmente más robustos que los LMs se retuvo a los primeros como modelo final (Lichstein et al 2002; Dormann et al. 2007). Al inspeccionar los residuos de los modelos SARs estos mostraron mayor independencia espacial (Anexo 2).

### **III. RESULTADOS**

La centralidad de los parches de *Polylepis* en la red espacial difiere considerablemente entre los gremios de preferencia de hábitat de las aves y al respecto de las características de cada parche. Los dos únicos gremios de preferencia de hábitat que mostraron resultados significativos fueron las aves especialistas de *Polylepis* y las generalistas (Figura 1).

Para los especialistas de bosques de *Polylepis* la centralidad decrece mientras aumenta el área ( $Z = -3,65$ ;  $P < 0,001$ ), el índice de forma ( $Z = -3,51$ ;  $P < 0,001$ ), la influencia de la matriz de páramo dentro del parche (PCI;  $Z = -10,36$ ;  $P < 0,001$ ) y la heterogeneidad del parche (PCII;  $Z = -3,78$ ;  $P < 0,001$ ), aunque la centralidad incrementa mientras aumenta la elevación ( $Z = 3,86$ ;  $P < 0,001$ ).

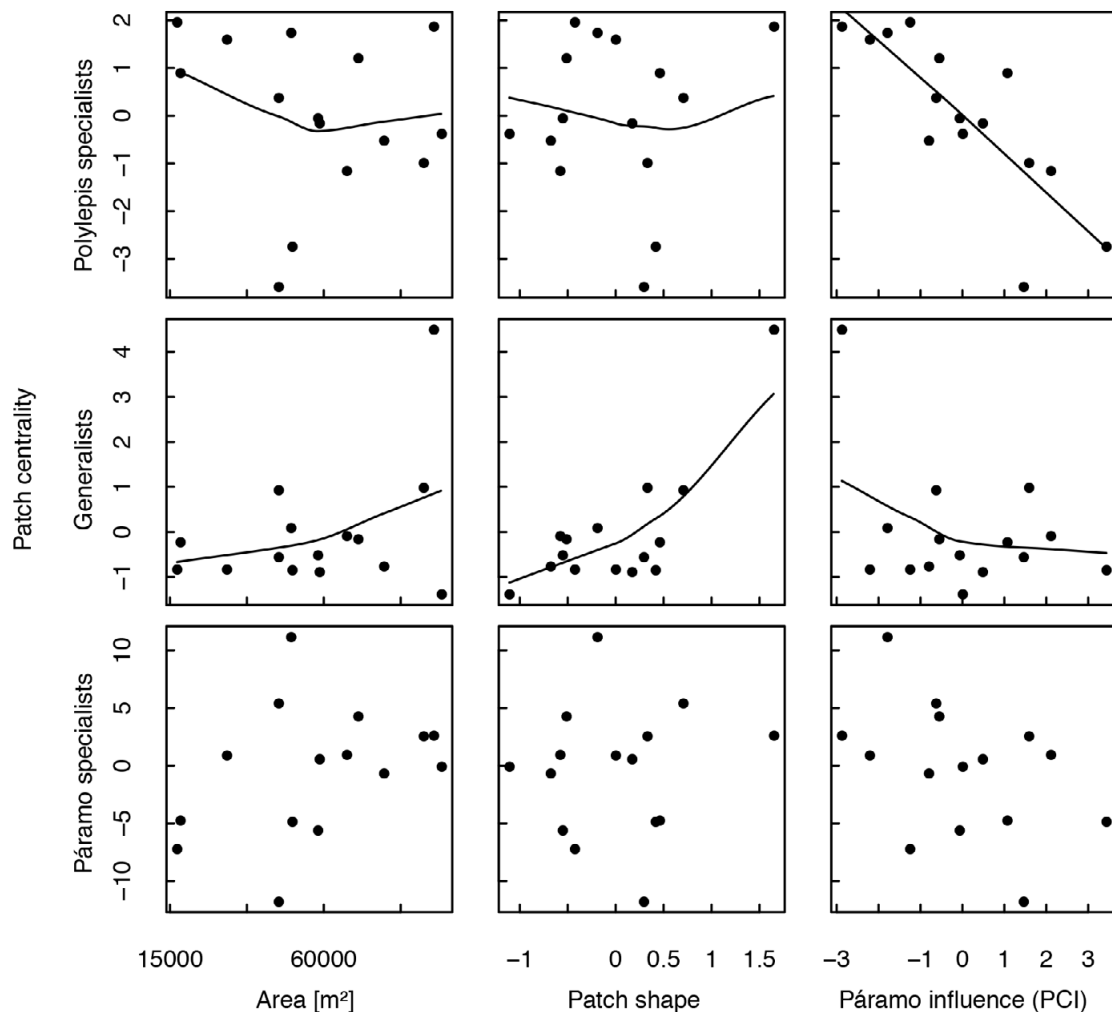


Figura 1. Relación del índice de centralidad frente a las características de 15 parches de Polylepsis para dos gremios de preferencia de hábitat de aves, Altoandinos, sur del Ecuador.

Para los generalistas la centralidad incrementa mientras aumenta el área ( $Z= 2,28$ ;  $P= 0,023$ ) y el índice de forma ( $Z= 2,30$ ;  $P= 0,022$ ); aunque disminuye mientras aumenta PCI ( $Z= -2,84$ ;  $P= 0,004$ ). Al respecto de la elevación y PCI no existen variaciones significativas.

Al identificar los parches de Polylepsis importantes para la conectividad de aves especialistas de bosques de Polylepsis se evidencia que los fragmentos con menor influencia de la matriz de páramo, con áreas pequeñas y con formas menos irregulares son nodos importantes de la red espacial. Mientras que fragmentos con áreas grandes, con menor influencia de la matriz del páramo y, con formas más irregulares son nodos importantes para la conectividad de aves generalistas en la red espacial. Finalmente, los parches de Polylepsis no influyen en la conectividad de aves especialistas de páramo (Figura 2).

#### IV. DISCUSIÓN

Al usar el enfoque de red espacial, se encontró que los parches de Polylepsis son nodos importantes en la conectividad (basado en la centralidad de parche) de la comunidad de aves alto-Andina, sur del Ecuador. La aproximación de centralidad

dentro de la relación parche-aves por cada gremio de preferencia de hábitat difiere al respecto de las características (i.e., área, forma, elevación, vegetación) del parche de Polylepsis.

Mientras incrementa el área del parche como así también la irregularidad en su forma, se reduce la centralidad del parche para aves especialistas de Polylepsis; aunque parches con estas características incrementan la centralidad de aves generalistas. Al respecto de la elevación, la centralidad del parche incrementa en aves especialistas de Polylepsis, pero no hay efecto para las generalistas. La mayor influencia de la matriz de páramo que rodea los parches de Polylepsis (PCI de la estructura y composición del hábitat) reduce la centralidad para ambos gremios, especialistas de Polylepsis y generalistas. De hecho, la centralidad de especialistas de Polylepsis responde negativamente a la influencia del páramo dentro del parche, indicando su fuerte asociación con la calidad de la matriz de páramo que rodea cada parche de Polylepsis. Definitivamente, el presente estudio demostró que la aproximación en red espacial es una herramienta conveniente para mejorar el conocimiento de la condición (i.e., cantidad y calidad) de los hábitats alto-Andinos en paisajes modificados por actividades humanas.

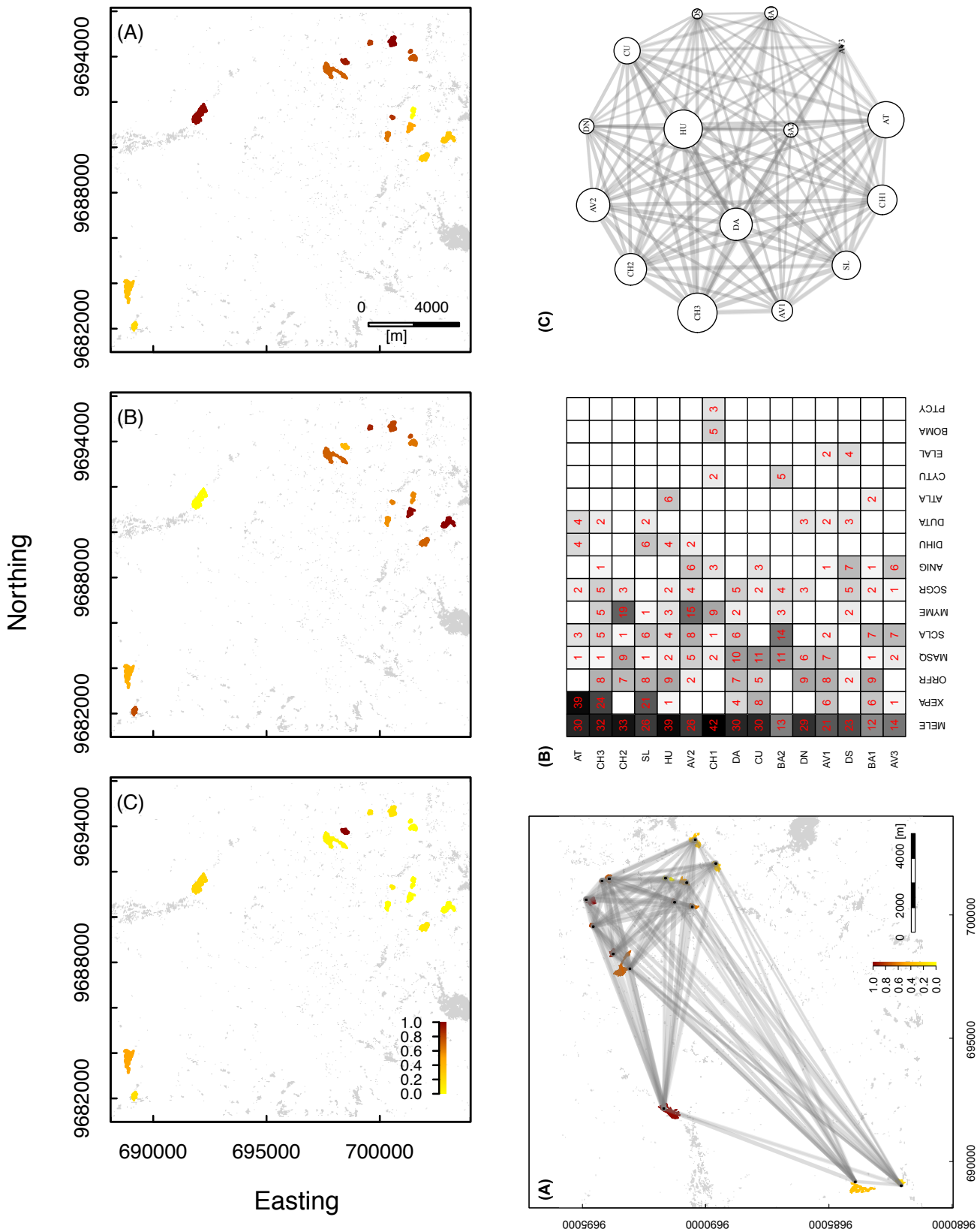


Figura 2. Visión topológica de la contribución de diversidad de aves para la conectividad de 15 fragmentos de Polylepis, Altoandinos, sur de Ecuador. Los índices de centralidad varían de 0-1, valores cercanos a 1 representan mayores valores de centralidad. La visión topológica está basada en índices de centralidad y se presenta separadamente: (A) aves especialistas de bosque de Polylepis; (B) aves generalistas; (C) aves especialistas de páramo. Para (A) se muestra la contribución de la diversidad de aves, líneas que tienden a ser más oscuras representan una mayor tasa de recambio en la diversidad de aves especialistas de Polylepis.

### IMPORTANCIA DE LOS PARCHES DE POLYLEPIS

Las medidas de centralidad, basadas en el recambio de la diversidad de especies de aves, demostraron que la importancia de los parches de Polylepis difiere entre gremios de preferencia de hábitat. Los parches más importantes para los especialistas de Polylepis son aquellos que tienen formas regulares, es decir, que tienen un débil efecto de borde, tienen una baja influencia de la matriz de páramo y, que están distribuidos a mayores elevaciones. Estos hallazgos corroboran que los especialistas de Polylepis evitan los parches alterados, sus bordes y son altamente dependientes de la calidad de la estructura y composición del hábitat (Cahill & Matthysen 2007; Tinoco et al, 2013). En consecuencia, la calidad de los parches de Polylepis en el área de estudio fue más importante que la cantidad. Resultados similares se han reportado para los Andes centrales de Suramérica, en donde las aves especialistas de Polylepis incrementan su abundancia en parches pequeños y aislados (Fjeldsá 1993). De este modo, la conservación de aves alto-Andinas dependiente de los bosques de Polylepis, debería considerar la importancia de parches pequeños y con vegetación madura; en especial una mayor densidad de árboles de Polylepis y vegetación propia de este tipo de bosques pueden ser particularmente ventajosa (Fjeldsá 1993; Lloyd 2008b).

Contrariamente a los efectos reportados en los especialistas de Polylepis, las aves generalistas responden positivamente a mayores áreas. Estudios previos en el área de estudio han reportado efectos positivos en la riqueza de aves al respecto del área de parche de Polylepis (Tinoco et al, 2013). Sin embargo, este mismo estudio argumenta que los efectos en la riqueza pueden variar a través de las diferentes especies, regiones y enfoques de investigación (Fjeldsá 1993; Lloyd 2008a; Tinoco et al, 2013). En este contexto, agrupar a las especies dentro de gremios de preferencia de hábitat mejora el conoci-

to sobre la respuesta de aves altamente especializadas en los hábitats que ocupan. En adición, la centralidad de aves generalistas respondió positivamente a mayor irregularidad en la forma del parche, este resultado refleja que las especies generalistas son capaces de soportar efectos de borde, e influencia de la matriz de páramo dentro de cada parche de Polylepis; parches con estas características contienen mayor diversidad de generalistas que especialistas de bosque (Grass et al, 2014). Finalmente, los especialistas de Polylepis dependen de una mayor calidad del parche y, la centralidad de los generalistas está más relacionada con la cantidad del parche; un aspecto importante en estos resultados divergentes es la elevación. Parches de Polylepis distribuidos en zonas de mayor elevación usualmente están más aislados de actividades humanas como la agricultura y construcción de carreteras (Astudillo et al, 2014), evidenciando de esta manera una mejor calidad del hábitat. Mientras que las aves generalistas tienen rangos de distribución más amplios (eg., 3400 - 4200 m; Astudillo et al, 2015), lo cual es una evidencia de la flexibilidad en el uso de parches alterados y a la vez de hábitats de páramo.

Futuros estudios deberían usar esta aproximación de red espacial para investigar la distribución y el aporte de la diversidad de aves alto-Andinas a una escala de paisaje. Las medidas de centralidad al considerar información de la diversidad de aves por gremios de preferencia de hábitat demuestra un enfoque muy conveniente para entender la conectividad de fragmentos a través del paisaje; así fragmentos que contienen diversidades muy similares estarían más conectados y a la vez serían más importantes para la conservación. Este enfoque de conectividad dentro de la red espacial demuestra una contribución funcional de la comunidad de aves (Rodríguez-Pérez et al, 2014) y cómo esta función ecológica varía en paisajes alterados por actividades humanas. Por último, esta información puede ser valiosa ya que ayuda a tomar mejores decisiones para la conservación en el mosaico de paisajes.

### AGRADECIMIENTOS

Este estudio estuvo financiado por la Universidad del Azuay (Fondos UDA 2013-33) y la Fundación Alemana para la Investigación (DFG FA925/5-1; C2: DFG PAK825). Agradecemos a Jacinto Guillén de la Universidad del Azuay por el apoyo constante a las investigaciones en aves alto-Andinas. El apoyo logístico fue proporcionado por personal del Parque Nacional Cajas.

### REFERENCIAS

- Astudillo, PX., Samaniego, GM., Machado, PJ., Aguilar, JM., Tinoco, BA., Graham, CH., & Farwig, N. (2014). The impact of roads on the avifauna of páramo grasslands in Cajas National Park, Ecuador. *Studies on Neotropical Fauna and Environment*, 49(3), 204-212.
- Astudillo, PX., Tinoco, BA., & Siddons, DC. (2015). The avifauna of Cajas National Park and Mazán Reserve, southern Ecuador, with notes on new records. *Cotinga*, 37, 1-11.
- Benham PM, Beckman EJ, Dubay SG, Flores LM, Johnson AB, Lelevier MJ & Witt CC (2011). Satellite imagery reveals new critical habitat for endangered bird species in the high Andes of Peru. *Endangered Species Research*. 13: 145-157.
- Bryan K. & Leise T. (2006). The \$25,000,000,000 eigenvector: the linear algebra behind Google. *SIAM Review*. 48: 569-581.
- Cahill JR & Matthysen E (2007). Habitat use by two specialist birds in high-Andean Polylepis forests. *Biological Conservation*. 140: 62-69.
- Delgado O, López F, Aguilar M & Cordero M (2006). Componente geomorfología glaciar del Parque Nacional Cajas - Ecuador. Reporte técnico no publicado. (Cuenca, Ecuador): Universidad del Azuay.
- Dormann CF, McPherson JM, Araújo MB, Bivand R, Bolliger J, Carl G & Wilson R (2007). Methods to account for spatial autocorrelation in the analysis of species distributional data: a review. *Ecography*, 30: 609-628.
- Fjeldsá J (1993). The avifauna of the Polylepis woodlands of the Andean highlands: the efficiency of basing conservation priorities on patterns of endemism. *Bird Conservation International*. 3: 37-55.
- Foley JA, Defries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR & Snyder PK (2005). Global consequences of land use. *Science*. 309: 570-574.
- Gardner TA, Barlow J, Chazdon R, Ewers RM, Harvey CA, Peres CA & Sodhi NS (2009). Prospects for tropical forest biodiversity in a human-modified world. *Ecology Letters*. 12: 561-582.

- Gareca EE, Hermy M, Fjeldsa J & Honnay O (2010). Polylepis woodland remnants as biodiversity islands in the Bolivian high Andes. *Biodiversity and Conservation*. 19: 3327–3346.
- Girvan M & Newman MEJ (2002). Community structure in social and biological networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 99: 7821–7826.
- Gómez JM, Nunn CL & Verdú M (2013). Centrality in primate-parasite networks reveals the potential for the transmission of emerging infectious diseases to humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 110: 7738–41.
- Grass I, Berens DG & Farwig N (2014). Guild-specific shifts in visitation rates of frugivores with habitat loss and plant invasion. *Oikos*. 123: 575–582.
- IERSE (2004). Estaciones meteorológicas de la cuenca del río Paute. (Cuenca, Ecuador): Reporte técnico no publicado. Universidad del Azuay.
- Jordán F, Benedek Z & Podani J (2007). Quantifying positional importance in food webs: a comparison of centrality indices. *Ecological Modelling*. 205: 270–275.
- Laurance WF, Sayer J & Cassman KG (2013). Agricultural expansion and its impacts on tropical nature. *Trends in Ecology & Evolution*. 1–10.
- Lichstein J, Simons T, Shriner S & Franzreb K (2002). Spatial autocorrelation and autoregressive models in ecology. *Ecological Monographs*. 72: 445–463.
- Lloyd H (2008a). Abundance and patterns of rarity of Polylepis birds in the Cordillera Vilcanota, southern Perú: implications for habitat management strategies. *Bird Conservation International*. 18: 164–180.
- Lloyd H (2008b). Influence of within-patch habitat quality on high-Andean Polylepis bird abundance. *Ibis*. 150: 735–745.
- Minga D & Verdugo A (2007). Riqueza florística y endemismo del Parque Nacional Cajas. Reporte técnico no publicado. (Cuenca, Ecuador): Herbario Azuay, Universidad del Azuay.
- Neuschulz E, Brown M & Farwig N. (2013). Frequent bird movements across a highly fragmented landscape: the role of species traits and forest matrix. *Animal Conservation*. 16: 170–179.
- Purcell J & Brelsford A (2004). Reassessing the causes of decline of Polylepis, a tropical subalpine forest. *Ecotropica*. 10: 155–158.
- Ridgely R & Greenfield P (2001). *The Birds of Ecuador: Field Guide*. Ithaca (New York): Cornell University Press.
- Rodríguez-Pérez J, García D & Martínez D (2014). Spatial networks of fleshy-fruited trees drive the flow of avian seed dispersal through a landscape. *Functional Ecology*. 28: 990–998.
- Sekercioglu C (2006). Increasing awareness of avian ecological function. *Trends in Ecology and Evolution*. 21: 464–471.
- Tinoco BA & Astudillo PX (2007). *Guía de campo de las aves del Parque Nacional Cajas*. (Cuenca, Ecuador): ETAPA.
- Tinoco BA, Astudillo PX, Latta SC, Strubbe D & Graham CH (2013). Influence of patch factors and connectivity on the avifauna of fragmented Polylepis Forest in the Ecuadorian Andes. *Biotropica*. 45: 602–611.
- Verboom J, Foppen R, Chardon P, Opdam P & Luttikhuisen P (2001). Introducing the key patch approach for habitat networks with persistent populations: an example for marshland birds. *Biological Conservation*. 100: 89–101.



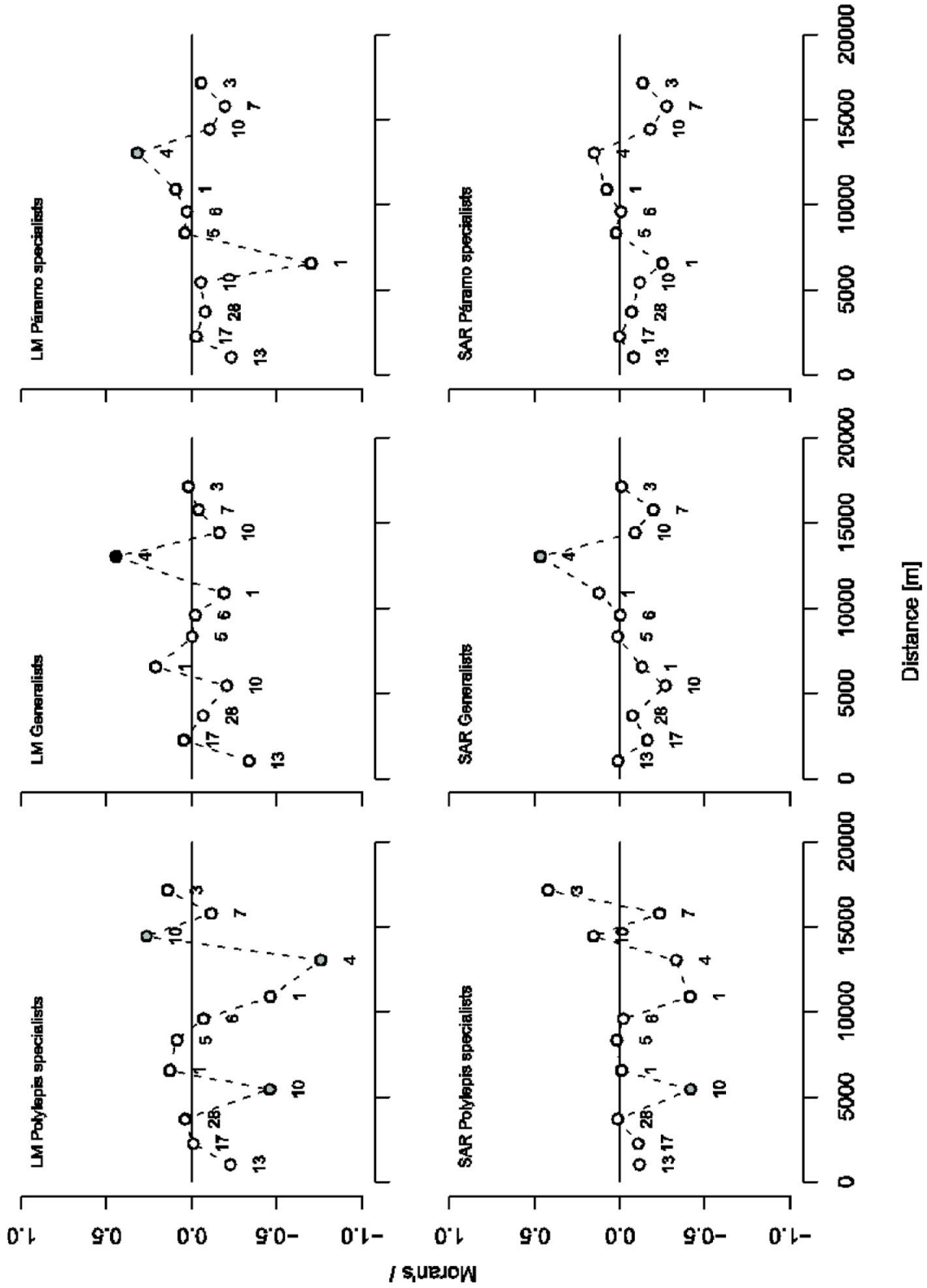
**Anexo 1**

Variables de estructura y composición de hábitat de 15 parches de Polylepsis, Altoandinos, sur del Ecuador. Las columnas 3-9 fueron usadas para calcular el análisis de componentes principales de cada parche (PCA; TABLA I). El área, el índice de forma, la elevación y los dos primeros componentes del PCA fueron usados para predecir la centralidad (conectividad) del parche de cada gremio de preferencia de hábitat dentro de una red espacial. Información espacial (longitud y latitud de los parches de Polylepsis) fue incluida en los modelos espaciales autorregresivos (SARs).

NOMBRE DE LA LOCALIDAD	CÓDIGO DEL PARCHÉ	DIVERSIDAD VEGETAL	PERFIL DE LA VEGETACIÓN	COBERTURA DE DOSEL (0-4)	PROMEDIO DE ÁRBOLES Y ARBUSTOS	PLANTAS NATIVAS DE PÁRAMO[%]	PLANTAS COSMOPOLITAS [%]	ÁRBOLES DE POLYLEPIS [%]	LONGITUD	LATITUD	PERÍMETRO [M]	ÁREA [M <sup>2</sup> ]	FORMA	ELEVACIÓN [M]
Ataudcocha	AT	1,21	2,24	3	93	3	60	37	698422	9693829	1467	44659	1,96	3929
Avilahuayco 1	AV1	1,56	2,21	2	101	17	50	32	701282	9690858	2221	57795	2,61	3947
Avilahuayco 2	AV2	1,88	1,96	3	77	23	50	26	700498	9691349	908	16484	1,99	3868
Avilahuayco 3	AV3	1,44	2,13	3	126	33	49	18	701464	9691717	1659	40004	2,34	3549
Barrancos 1	BA1	1,42	2,08	2	121	29	55	16	702057	9689684	2127	73926	2,21	3828
Barrancos 2	BA2	1,37	2,18	3	71	14	58	28	703010	9690515	3129	103371	2,76	3703
Chuspipuñuna 1	CH1	1,99	2,20	3	109	14	49	37	701443	9693991	1577	56993	1,86	3690
Chuspipuñuna 2	CH2	1,97	2,10	3	44	3	55	42	701354	9694282	492	15982	1,11	3745
Chuspipuñuna 3	CH3	1,35	2,13	3	117	9	56	34	700603	9694921	2480	81880	2,45	3863
Cucheros	CU	1,26	2,15	3	73	15	62	24	700314	9690636	1948	39960	2,75	4002
Derrumbo Amarillo	DA	1,16	2,23	4	92	4	69	27	699527	9694637	968	25107	1,72	4029
Dublaycocha 1	DN	1,75	1,99	3	82	33	45	21	689285	9684050	6439	147872	4,72	3947
Dublaycocha 2	DS	1,63	2,02	2	197	29	50	18	689133	9682190	1941	45206	2,58	3921
Huagrahuma	HU	1,12	2,03	3	28	3	27	70	692218	9691789	9067	162103	6,35	3767
San Luis	SL	1,35	2,13	3	99	15	67	18	697837	9693155	5677	173634	3,84	3913

**Anexo 2**

Autocorrelación espacial, basado en el índice de Moran's I, de los residuos estandarizados de modelos de regresión lineal (LMs) y modelos espaciales autorregresivos (SARs) por cada gremio de afinidad de hábitat de las aves. El índice de Moran's I fue evaluado en clases discretas de 1500 m. Los círculos representan los 15 parches de Polyplepis, Altoandinos, sur del Ecuador. Los colores de cada círculo indican los niveles de significancia (negro:  $P < 0.01$ ; gris:  $P < 0.05$ ; blanco:  $P > 0.1$ ).



# Análisis y modelado de episodios de intensa contaminación por PM<sub>10</sub> en Madrid con Sistemas de Información Geográfica

Cañada Torrecilla, María Rosa<sup>1</sup>, Moreno Jiménez, Antonio<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geografía/Facultad de Filosofía y Letras/Universidad Autónoma de Madrid  
Francisco Tomás y Valiente, 1.  
28049 Madrid (España)  
rosa.canada@uam.es, antonio.moreno@uam.es

## RESUMEN

La conjunción de técnicas estadísticas y SIG está facilitando clarificar la relación entre la atmósfera urbana y la polución del aire y en esta investigación, profundizando en trabajos previos, se abordan dos objetivos principales: primero, determinar y caracterizar los tipos de tiempo asociados a concentraciones altas y severas de PM<sub>10</sub> en Madrid y, segundo, tras elegir un episodio de severa contaminación, estimar y visualizar su distribución intraurbana diaria durante el periodo que dura.

La información (diaria) utilizada ha sido la concentración media de PM<sub>10</sub> y datos de diferentes variables meteorológicas para caracterizar los tipos de tiempo, considerando un período sexenal desde 2010 a 2015.

La metodología ha consistido en la aplicación de técnicas estadísticas para definir qué es contaminación elevada y extrema, y de técnicas de interpolación espacial para modelar la concentración de PM<sub>10</sub> en la ciudad de Madrid.

Los resultados evidencian, por un lado, que los episodios de alta contaminación abundan más en verano, donde la principal fuente de emisión de partículas es el polvo sahariano, y en invierno, donde lo son los procesos de combustión, favorecidos por la baja capacidad de dispersión de la atmósfera en esta época. Por otro lado, los mapas interpolados para el período crítico estival examinado han posibilitado identificar y visualizar los niveles de polución por PM<sub>10</sub> que se soportan en las distintas zonas de la ciudad. Todo ello abre vías para políticas preventivas mejor fundadas, discriminando incluso zonas dentro de la ciudad, y para análisis de salud pública y de justicia ambiental.

Palabras clave: **Contaminación urbana, PM<sub>10</sub>, tipo de tiempo, interpolación espacial, Madrid.**

## ABSTRACT

*Joint use of statistics and GIS are considerably aiding to elucidate the relations between urban atmosphere and air pollution. In this paper, deepening in previous works, two main objectives are addressed: First, to outline and characterize the weather types associated to high and severe PM<sub>10</sub> concentrations in Madrid, and second, focusing on one severe pollution episode, to estimate and visualize the daily intra urban distribution of a pollutant along the period.*

*The information used includes the daily medium average of PM<sub>10</sub> as well as some other meteorological variables, in order to better characterize the weather types, considering a sexennial period from 2010 to 2015.*

*Methodologically, various statistical techniques have been applied for a precise definition of High and Extreme pollution levels, and spatial interpolation has been used to estimate surface models of PM<sub>10</sub> concentrations in the city of Madrid.*

*Results show, on the one hand, that episodes of high pollution occur more commonly in summer, when the main source of particle's emission is the Saharan dust. It also happens in winter, due to combustion processes increased by the low capacity of dispersion in the atmosphere in this season. Interpolated maps for the critical summer period examined have allowed to identify and to visualize the PM<sub>10</sub> pollution levels affecting different areas of the city. These findings encourage better founded policies and prevention, even discriminating different areas within the city; as well as more refined analysis on public health and environmental justice issues.*

**Keywords:** *Urban pollution, PM<sub>10</sub>, weather types, spatial interpolation, Madrid.*

## I. INTRODUCCIÓN

Las partículas son uno de los contaminantes más peligrosos para la salud en las grandes ciudades como Madrid. Este contaminante es uno de los indicadores más utilizados en los informes sobre calidad y salud de la OMS, en los de la Agencia Europea de Medio ambiente (AEMA), en el Programa APHEIS (Contaminación atmosférica y Salud: un Sistema de Información Europeo (Alonso et al., 2005) y, en general, en todos los informes que se elaboran sobre calidad del aire.

Las partículas en suspensión abarcan un amplio espectro de sustancias orgánicas e inorgánicas, dispersas en el aire, procedentes de fuentes naturales y artificiales (Gurjar et al., 2010). La combustión de carburantes fósiles generada por el tráfico (la principal fuente de contaminación por partículas en la ciudad de Madrid) puede producir diversos tipos de partículas: partículas grandes, por la liberación de materiales no quemados (cenizas volátiles), partículas finas, formadas por condensación de materiales vaporizados durante la combustión, y partículas secundarias, generadas mediante reacciones químicas entre los contaminantes desprendidos como gases en la atmósfera. Tampoco hay que olvidar las procedentes por la resuspensión de materiales procedentes del firme de la calzada, como consecuencia de la abrasión mecánica de vehículos, frenos, ruedas, etc. y las derivadas de obras de construcción, demolición, etc. A ello hay que añadir el polvo mineral procedente del Sahara que con frecuencia alcanza el centro de la Península Ibérica (Salvador et al. 2004, 2008) e incluso llega hasta Atenas (Grigoropoulos et al., 2009; Remoundaki et al., 2011).

En relación con sus efectos sobre la salud se suelen distinguir las PM<sub>10</sub> (partículas "torácicas" menores de 10 micras (µm), que pueden penetrar hasta las vías respiratorias bajas), las PM<sub>2.5</sub> (partículas "respirables" menores de 2,5 µm, que pueden penetrar hasta las zonas de intercambio de gases del pulmón), y las partículas ultrafinas, menores de 100 nm (nanómetros), que pueden llegar a pasar al torrente sanguíneo. Los estudios toxicológicos indican que las partículas finas de origen antrópico, especialmente las generadas por la combustión de carburantes fósiles, provocan mayores daños sobre la salud que las partículas de origen geológico, como el polvo sahariano, al que a veces se suele imputar la contaminación.

Numerosos estudios epidemiológicos afirman que existe una relación entre la exposición al material particulado atmosférico y diversos efectos adversos sobre la salud, tales como afecciones respiratorias y cardiovasculares. Su influencia

sobre el clima se recoge también en algunos estudios que tratan de evaluar la influencia de las partículas sobre el balance radiativo, formación de nubes y albedo. Finalmente, los ecosistemas también sufren los efectos de la exposición a las partículas atmosféricas ya que su deposición puede suponer la acidificación y eutrofización de suelos y aguas superficiales y repercutir sobre la composición de las aguas subterráneas (Querol et al., 2006).

Su inmisión depende de la dinámica atmosférica, que influye en su dispersión, estancamiento o en su transporte, como se ha puesto de manifiesto en numerosos estudios sobre Barcelona, el Mediterráneo Occidental (Viana et al., 2005; Querol et al., 2003; Rodríguez et al., 2002) o sobre Madrid (Cañada, 2017).

Esta comunicación se sitúa en esta línea de estudio y arranca de un trabajo previo donde se elaboró una tipología de tipos de tiempo en la ciudad de Madrid y una caracterización de los mismos según la concentración de contaminantes asociada (Cañada, 2017). Ahora se pretende avanzar un paso más, estableciendo primero los periodos de intensa y extrema contaminación por partículas (PM<sub>10</sub>) en la ciudad de Madrid durante el sexenio 2010-2015 y su relación con el tipo de tiempo dominante durante los mismos, lo que permitirá identificar los escenarios atmosféricos singularmente críticos. Seguidamente, y tras elegir uno de esos periodos, se procederá a modelar el comportamiento espacial del contaminante en la ciudad, con el fin de hacer visible cartográfica y diacrónicamente el decurso de la concentración de PM<sub>10</sub> a lo largo de la secuencia de días que duró el episodio. En síntesis, se espera profundizar en el conocimiento del nexo entre tipos de tiempo y alta polución del aire y desvelar las condiciones ambientales vividas por la población en las distintas zonas de la ciudad.

En el apartado siguiente se presentan brevemente los aspectos metodológicos, para luego extendernos en el análisis de resultados, particularmente la frecuencia de días de alta y severa contaminación en cada tipo de tiempo y el estudio espacio-temporal de un episodio ejemplar en 2012, breve pero de intensa concentración de PM<sub>10</sub>. Se terminará con unas breves conclusiones y perspectivas.

## II. DATOS Y MÉTODOS

La tipología de tipos de tiempo se ha establecido con información meteorológica diaria de superficie y de altura de la estación sinóptica de Madrid (Barajas) (vid. Cañada, 2017), aunque para averiguar las causas meteorológicas del periodo de intensa contaminación por PM<sub>10</sub> seleccionado se ha recurrido

además a información de las estaciones sinópticas de Cuatro Vientos y Getafe de esos mismos días. Las variables meteorológicas empleadas han sido de superficie: la presión, temperatura máxima y mínima, dirección y velocidad del viento, humedad relativa y cubierta nubosa. Los datos de altura corresponden a la superficie de 850 hPa y han sido: altura a que se encuentran los 850 hPa, temperatura a esa altura, temperatura del punto de rocío y dirección y velocidad del viento. El indicador utilizado para el estudio de episodios de elevada concentración de  $PM_{10}$  por  $m^3$  es la media diaria. Al ser reducido el número de estaciones del Ayuntamiento de Madrid que miden partículas (sólo doce), para el modelado de la distribución espacial de la contaminación por  $PM_{10}$  en el periodo anómalo seleccionado (entre el 26 y el 29 de junio de 2012), se ha recurrido además a datos de seis estaciones de municipios limítrofes a Madrid, pertenecientes a la red de calidad del aire de la Comunidad de Madrid (figura 1).

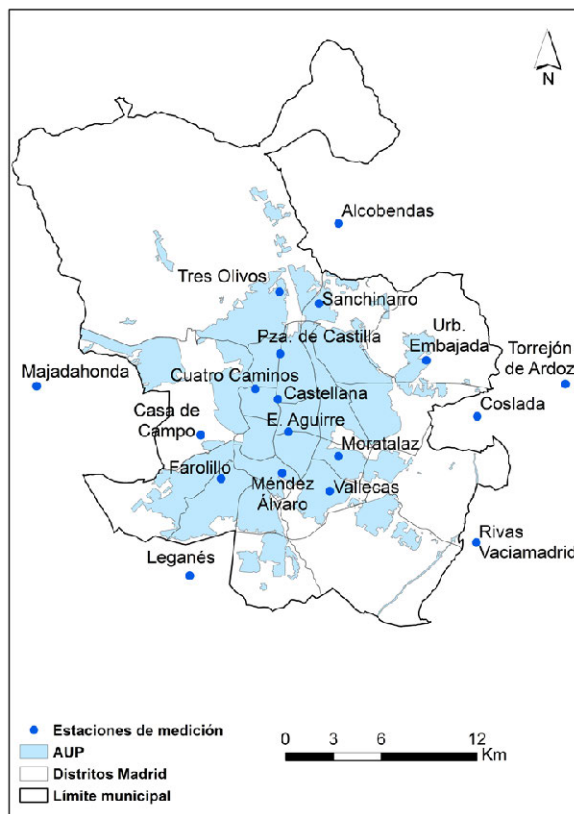


Figura 1. Ubicación de las estaciones de medida de contaminación por  $PM_{10}$  en Madrid y área limítrofe  
Fuente: Elaboración propia

El foco de interés recae en el área urbana poblada (AUP 2015), esto es, la zona donde hay presencia habitual de residentes y que excluye las grandes áreas de uso industrial y de transporte. Su delimitación se realizó a partir del manejo y contraste de información de más de 30 capas cartográficas diferentes procedentes de diversas fuentes (IGN, Ayuntamiento de Madrid, IECM, etc.). Destaca, sobre todo, la labor de interpretación de imágenes aéreas (Plan Nacional de Ortofotografía Aérea del Instituto Geográfico Nacional) y de cartografía de usos del suelo (Corine Land Cover, CLC2006).

Como cartografía digital básica se ha usado la del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (IECM), vigente en 2015, para los distritos municipales y término municipal.

El método para el estudio de los episodios de contaminación por  $PM_{10}$ , habitualmente empleado en trabajos de semejantes características, se basa en establecer una diferenciación entre días con contaminación elevada y días con contaminación severa en el periodo que se extiende desde el 1 de enero de 2010 al 31 de diciembre de 2015. Se considera día con alta contaminación aquel en el que la concentración diaria del contaminante está entre 2 y 3 puntuaciones Z sobre el promedio diario de todo el periodo. Si el valor diario es igual o superior a 3 Z el día se considera con contaminación severa (Kalstein y Corrigan, 1986; Kassomenos et al., 2003). El recuento de estos días se ha realizado para cada tipo de tiempo establecido en un trabajo de investigación previo en vías de publicación (Cañada, 2017).

Para realizar una cartografía diacrónica del episodio de elevada contaminación por  $PM_{10}$  (26-29 junio de 2012) se ha recurrido a técnicas de interpolación espacial implementadas en la extensión Geostatistical Analyst de ArcGIS 10.2. Las capas resultantes se exportarán a raster con una resolución de 50 m. Por último, se recortarán para ajustarlas a los límites de la zona urbana poblada (AUP 2015), mediante una operación de álgebra de mapas. En el análisis se abordará la secuencia desde un día previo a uno posterior al periodo de alta intensidad de contaminación, para caracterizar su dinámica espacio-temporal en una perspectiva diacrónica.

### III. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### III.1. FRECUENCIA DE LOS EPISODIOS DE ALTA CONTAMINACIÓN Y CONTAMINACIÓN SEVERA POR $PM_{10}$ EN MADRID ENTRE 2010-2015

##### III.1.1. Episodios de alta contaminación por $PM_{10}$

Entre el 1 de enero de 2010 y el 31 de diciembre de 2015 se han contabilizado para toda la red un promedio de 45 días con alta polución de  $PM_{10}$ , es decir, con valores diarios entre 2 y 3 desviaciones típicas respecto de la media de todo el periodo (Kalstein y Corrigan, 1986; Kassomenos et al., 2003). El examen de la tabla I indica que estos episodios van asociados a tipos de tiempo diferentes (excepto el 1 y 4) y que se pueden desencadenar en varios momentos del año, si bien, hay dos tipos que destacan sobre el resto: el 9 y en menor medida el 6. Corresponden a dos estaciones del año donde la inmisión de partículas es importante, el verano, donde la principal fuente de partículas es el polvo sahariano, y el invierno donde lo son los procesos de combustión, favorecidos por la baja capacidad de dispersión de la atmósfera en esta época (Artiñano et al., 2003). El tipo 9, anticiclónico de verano, es el que presenta la máxima frecuencia, alcanzando una media de 22 días (tabla I). La configuración isobárica que desencadena este tipo de tiempo es una cresta sahariana centrada sobre la Península Ibérica, con su eje en torno a los 5° oeste (Martín Vide y Olcina Cantos, 2001) con un predominio de las altas presiones en altura y bajas presiones térmicas en superficie. Bajo estas condiciones meteorológicas se dificulta la dispersión de contaminantes. A nuestra región llegan masas de aire muy cálidas y secas, procedentes del norte de África que desencadenan polvo en suspensión y calima. Las temperaturas máximas son muy elevadas, alcanzan 32,3 °C de media, aunque las máximas diarias pueden llegar a 40 °C, y las mínimas llegan a 16 °C de media. Se acompañan de vientos del suroeste, tanto en superficie como en altura, velocidades entre 2,8 y 2,73 m/s (brisas suaves según Beaufort), valores exiguos de humedad relativa (22,4%) y mínima cubierta nubosa (2 octas), luego alto valor de insolación. La altura media a la que se alcanza los

850 hPa es de 1546,3 metros, donde la temperatura llega a de 17 °C (Cañada, 2017).

**TABLA I**  
DÍAS DE ALTA CONTAMINACIÓN DE PM<sub>10</sub> POR TIPO DE TIEMPO Y ESTACIONES. MADRID, 2010-2015

ESTACIÓN	T. 2	T. 3	T. 5	T. 6	T. 7	T. 8	T. 9	TOTAL
C. Campo	3	3		5	2	3	21	37
C. aminos	3	1	1	14	9	1	18	47
E. Aguirre	3	2	1	9	11	3	34	63
Farolillo	4	3	1	12	6	3	24	53
M. Alvaro	4	2	2	17	12	2	21	60
Moratalaz	4		2	6	3	3	18	36
Castellana	3	1	2	9	1	5	19	40
P. Castilla	4		2	16	4	5	16	47
Sanchinarro	3	1	2		2	4	23	35
Tres Olivos	4	2	2	6	4	3	23	44
U. Embajada	4	2	2	2		3	20	33
Vallecas	5	4	2	6	1	4	23	45
Media	4	2	2	9	5	3	22	45

Fuente: Elaboración propia

Con una frecuencia media de 9 días le sigue el tipo de tiempo 6, anticiclónico de invierno (tabla I). La situación sinóptica de este tipo de tiempo dibuja un centro de altas presiones muy potente sobre el interior de la Península Ibérica que se corresponde con una dorsal en altura. La masa de aire, en origen tropical marítima, experimenta un enfriamiento paulatino en el interior de la Península hasta transformarse en una masa de aire fría y seca. Es un tipo de tiempo con amplias oscilaciones diurnas de temperatura y frecuentes heladas. Presenta las temperaturas mínimas más bajas de todos los tipos de tiempo, la mínima promedio es -0,41°C, debido al enfriamiento del aire en contacto con la superficie fría, por la fuerte irradiación nocturna, favorecida por cielos despejados; temperaturas más altas a 850 hPa (6,3°C de media), siendo, por tanto, frecuentes las inversiones térmicas; ellas impiden los movimientos ascendentes del aire y favorecen el estancamiento de los contaminantes. La temperatura media a 850 hPa es 6,3°C. Los vientos son del suroeste en superficie (0,83 m/s) y del noroeste en altura (1,21 m/s). Su máxima frecuencia se da en los meses de diciembre, enero y febrero. Este tipo de tiempo suele ser muy persistente y durar varios días seguidos (Cañada, 2017).

Los tipos de tiempo 7, 2 y 8, con frecuencias de 5, 4 y 3 días respectivamente (tabla I), corresponden a situaciones anticiclónicas, con características meteorológicas intermedias entre las dos anteriores. El tipo 7 presenta una configuración isobárica semejante al 6, pero con masas de aire más cálidas. La temperatura máxima alcanza un promedio de 23,3°C y la mínima 7,1°C. Vientos del sureste tanto en superficie, como en las capas altas de la atmósfera (0,95 m/s y 0,97 m/s respectivamente). Aire muy seco y escasas nubes (1,8 octas). Es más habitual en los meses de primavera (abril) y otoño (octubre). El tipo 2 agrupa los días con masas de aire polares marítimas que llegan a latitudes muy bajas a través de una gran vaguada atlántica, donde se calientan y envían a la Península vientos húmedos de componente suroeste en superficie (2,65 m/s) y de mayor velocidad (6,36 m/s) en las capas altas de la atmósfera. Sobre el interior de la Meseta hay altas presiones con temperaturas de 13,6°C (máximas medias) y 5,2°C (mínimas medias), un contenido en humedad del 68% y una cubierta nubosa de 7 octas. Este tipo de tiempo predomina principalmente en los meses de enero y diciembre, aunque noviembre también tiene alta frecuencia. El tipo 8 es un tipo de tiempo

con promedios de temperatura máxima de 23,8°C y mínima de 12,5°C, consecuencia de masas de aire tropicales marítimas que llegan a la región con procedencia suroeste a partir de una vaguada atlántica que se corresponde en superficie con una baja presión. La Meseta queda en una situación de altas presiones o de bajas presiones relativas. Los vientos del suroeste soplan desde brisa breve en superficie (4,73 m/s) a brisa moderada a 850 hPa (5,97 m/s). La humedad llega al 42% y la cubierta nubosa es de 5,4 octas. Este tipo de tiempo es representativo de los meses de octubre y septiembre, por un lado, y de abril y mayo por otro (Cañada, 2017).

Los tipos de tiempo 1 y 4 no registran ningún episodio de alta contaminación por PM<sub>10</sub> y no se han incluido en la tabla I ni en la figura 2. En el primer caso es un tipo tiempo anticiclónico con presiones no muy elevadas, con brisa leve del suroeste en superficie (5,29 m/s) y brisa moderada a 850 hPa (7,98 m/s) (según la escala Beaufort) y el segundo, es un tipo de tiempo inestable con una masa de aire polar continental procedente del interior de Europa, que llega a nuestra región a través de una vaguada con un eje NE-SW, canalizada por una borrasca ubicada en el mar Ligur. Los vientos son de componente NW en superficie (5,6 m/s) y del NE en altura (7,1 m/s) (brisa moderada en la escala de Beaufort).

El reparto espacial de los días de alta contaminación por partículas (tabla I, figura 2) nos indica que las estaciones que muestran las máximas frecuencias son las de tráfico y de fondo urbano. Las de Escuelas Aguirre y Méndez Álvaro registran 63 y 60 días respectivamente, en todo el período. Seis estaciones presentan entre 40 y 60 días. Por encima de 30 y por debajo de 40 días hay cuatro estaciones, donde además de la estación suburbana de Casa de Campo y de las estaciones urbanas de fondo de Sanchinarro y Urbanización Embajada, hay que mencionar a Moratalaz que es de tráfico. Esta distribución espacial que presentan las partículas en la ciudad se explica por la doble influencia en su formación del polvo arrastrado por el viento y de las emisiones de vehículos y otros medios de combustión (Fernández, 2005).

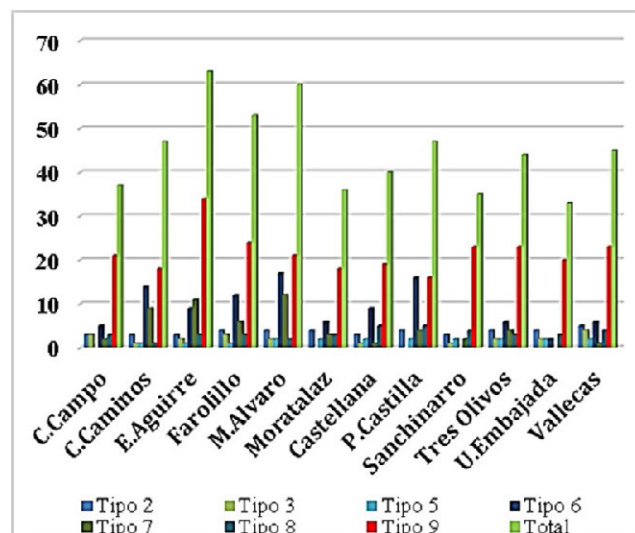


Figura 2. Número de días con alta contaminación de PM<sub>10</sub> por tipo de tiempo y estaciones. Madrid, 2010-2015

Fuente: Elaboración propia

### III.1.2. Episodios de contaminación severa por PM<sub>10</sub>

Se considera día con contaminación severa aquel cuyo valor diario es igual o superior a 3 puntuaciones Z (Kalstein y Corrihan, 1986; Kassomenos et al., 2003). El promedio de toda la red

asciende a 26 días en todo el periodo (tabla II). El tipo de tiempo de verano (9) es el que presenta la máxima frecuencia de estos episodios de contaminación severa, de manera bastante destacada sobre el resto. Se han contabilizado 18 días de media. Las masas de aire procedentes del norte de África son las responsables de que se alcancen elevados niveles de inmisión. Le siguen, a bastante distancia, el resto de tipos de tiempo en donde puede aparecer, de manera ocasional, algún día de severa contaminación. Como sucedía con los días de alta contaminación, los tipos de tiempo 1 y 4, tampoco presentan ningún día de contaminación severa y no se han incluido en la tabla II ni en la figura 3. Todas las estaciones de medición presentan valores por encima de 20 días de contaminación severa. El examen de la tabla II y de la figura 3 no permite establecer diferencias claras entre estaciones teniendo en cuenta su ubicación, es decir, si son de tráfico, de fondo urbano o suburbanas. Las que registran la máxima frecuencia son Moratalaz (33 días) y Sanchinarro (32 días) y la que menos Farolillo (20 días).

**TABLA II.**  
DÍAS DE CONTAMINACIÓN SEVERA DE PM<sub>10</sub> POR TIPO DE TIEMPO Y ESTACIONES. MADRID, 2010-2015

ESTACIÓN	T. 2	T. 3	T. 5	T. 6	T. 7	T. 8	T. 9	TOTAL
Casa Campo	3	2	3				19	27
C. Caminos	4	2	1	2	1	1	14	25
E. Aguirre	3	2	1	2	2		12	22
Farolillo	2	1	2	4			11	20
M. Álvaro	3	1	1	3			13	21
Moratalaz	4	4	1	1	1		22	33
Castellana		3	1	1	1		17	23
P. Castilla	2	4		4	1	1	15	27
Sanchinarro	2	3	1	1	1		24	32
Tres Olivos	4	2	1	1	1		20	29
U.Embajada	2	3	1				23	29
Vallecas	2	2	2		2		20	28
Media	3	2	1	2	1	1	18	26

Fuente: Elaboración propia

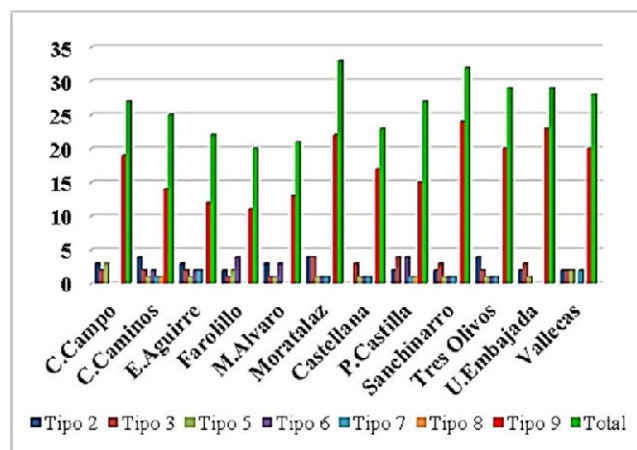


Figura 3. Número de días con contaminación severa de PM<sub>10</sub> por tipo de tiempo y estaciones. Madrid, 2010-2015  
Fuente: Elaboración propia

### III.2. ANÁLISIS DEL EPISODIO DE CONTAMINACIÓN POR PM<sub>10</sub> DEL 26 AL 29 DE JUNIO DE 2012

#### III.2.1. Caracterización sinóptica y variables meteorológicas

Entre los días 26 y 29 de junio de 2012 se produce una invasión de aire sahariano que alcanza nuestra zona de estudio y queda reflejada en los datos registrados en todas las esta-

ciones de Madrid, que duplican y casi triplican el valor diario permitido por la legislación, fijado en 50 µg/m<sup>3</sup>, como se puede apreciar en la figura 4. No todos los días se pueden clasificar de la misma manera. Así, los días 25 y 30 de junio estarían fuera de lo que se ha denominado episodio de alta contaminación; el día 26 si sería un día de elevada contaminación y el resto de días (27, 28 y 29 de junio) serían días de contaminación severa, pues sus valores superan 3 desviaciones típicas respecto a la media del periodo (2010-2015). Todo el episodio se enmarca dentro del tipo de tiempo 9, anticiclónico característico de la estación estival, y ligado a la influencia de masas de aire tropical marítimo y tropical continental.

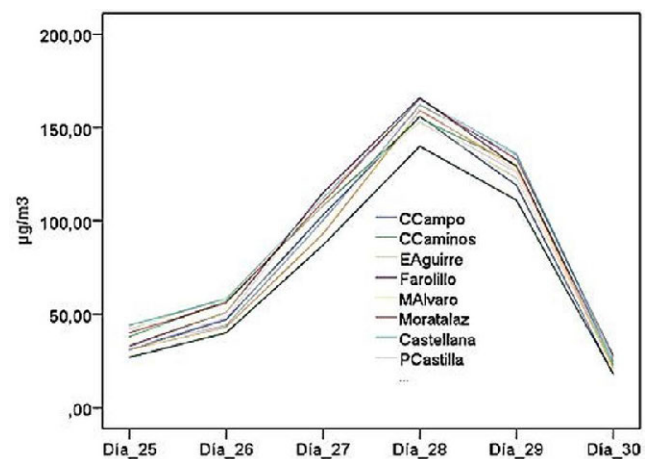


Figura 4. Evolución de la concentración de PM<sub>10</sub> en las estaciones de la red de calidad del aire de Madrid, durante el episodio del 26 al 29 de junio de 2012

Fuente: Elaboración propia

Este episodio de alta contaminación va precedido de una ola de calor que se inicia días antes de la irrupción de la masa de aire africana. El día 25, como se puede apreciar en la tabla III, se superan los 38°C de máxima en las tres estaciones sinópticas de Madrid (Barajas, Cuatro Vientos y Getafe) y se alcanzan casi los 40°C al día siguiente, permaneciendo el resto de los días entre 37 y 39°C. Las temperaturas mínimas superan los 20°C todos los días (noches tropicales) excepto el día 30, cuando se aproxima una masa de aire más fresca procedente del Atlántico. El viento de componente sur, que es el que arrastra el polvo en suspensión, no empieza a llegar hasta el 26 y continúa durante los días 27, 28 y 29 con dirección SSW, aunque la máxima concentración de partículas se produce el día 28, cuando las temperaturas ya no son tan elevadas como la de los dos días precedentes.

La situación sinóptica está caracterizada por bajas presiones relativas en superficie ligadas al calentamiento del aire superficial y por una cresta anticiclónica a 850 hPa, que favorece la advección de masas de aire cálido y seco hacia la Península durante los días 26 al 29 (véase figura 5). Existe una subsidencia generalizada que propicia el calentamiento adiabático adicional y valores elevados de radiación solar. En la secuencia de mapas de la figura 5 se aprecia que el día 25 una lengua de aire cálido alcanza el suroeste de la Península Ibérica donde la temperatura a 1560 m, es de 25°C. De manera progresiva se va extendiendo hacia el interior y hacia el norte los días 26 y 27. El 28 se desplaza hacia el sureste de la Península y poco a poco se sitúa en el Mediterráneo al oeste de las Islas Baleares, dejando paso, el día 30, a otra masa de aire más fresca de procedencia atlántica, que produce una bajada de las temperaturas, tanto diurnas como nocturnas (véase tabla III y figura 5). La Agencia Espacial de Meteorología (AEMET, 2012) señala el

mes de junio de 2012 como el mes más cálido desde 1960, por detrás de 2003, 2004 y 2005. Las temperaturas mensuales superaron en más de 3°C el valor medio normal en la mayor parte de las zonas incluidas en la mitad suroriental peninsular.

**TABLA III**  
CARACTERÍSTICAS METEOROLÓGICAS DE LOS DÍAS 25 AL 30 DE JUNIO DE 2012 EN OBSERVATORIOS DE MADRID

DÍAS	ESTACIÓN	T. MÁX.	T. MÍN.	HR %	DIRECCIÓN VIENTO	VELOCIDAD KM/H
25	Barajas	38,5	21,8	22,5	N	10
	Cuatro Vientos	38	22,8	30,6	NNE	1,9
	Getafe	38,2	23,4	32,6	NNE	6,3
26	Barajas	39,9	22,3	21,9	N	8,3
	Cuatro Vientos	39,8	24,4	27,6	S	8,6
	Getafe	39,6	23,6	32	S	6,3
27	Barajas	37,9	22,2	20,1	SSW	11,5
	Cuatro Vientos	38,2	25	26,6	SW	11,7
	Getafe	39,2	25,4	31,2	SSW	11,5
28	Barajas	37,2	23,2	19,8	SW	20,3
	Cuatro Vientos	37,2	23,9	27	SW	21
	Getafe	38	23,8	34	SW	27,1
29	Barajas	34	20,9	24,1	SW	20,3
	Cuatro Vientos	33,5	20	33,3	SW	20,4
	Getafe	34,4	20,4	39,8	WSW	21,8
30	Barajas	29,2	18	27,2	SW	17,8
	Cuatro Vientos	28,2	16	34,3	WSW	19,1
	Getafe	29	16,8	42,4	W	19,3

Fuente: Elaboración propia

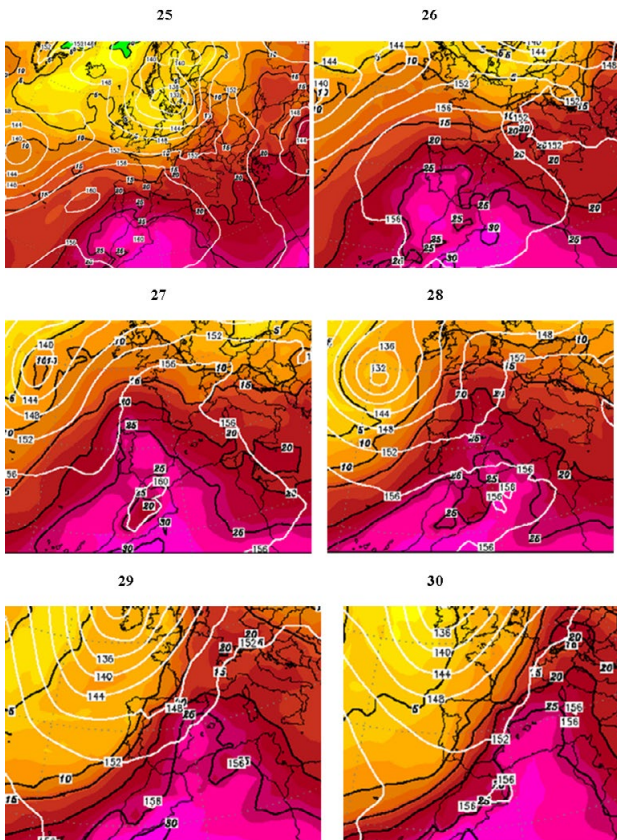


Figura 5. Altura geopotencial (Dm) y temperatura (°C) a 850 hPa durante los días 25-30 de junio de 2012  
Fuente: www.wetterzentrale.de

### III.2.2. Modelado de la distribución espacial de PM<sub>10</sub> durante el episodio del 26 al 30 de junio del 2012

Para disponer de datos de contaminación en todo el espacio urbano se ha interpolado con el método media ponderada por el inverso de la distancia (IDW, inverse distance weighting). Se descartó el método Kriging porque producía excesivo suavizado, aumentando la distancia media entre valores medios observados y estimados. Detalles del proceso de cálculo se pueden consultar en Cañada et al. (2014)

Los parámetros utilizados en la interpolación han variado según los días. Los únicos que han permanecido constantes son, el número de vecinos, que ha variado entre un máximo de 5 y un mínimo de 2, y el número de sectores en que se ha dividido la elipse, que han sido cuatro de 45°. Al considerar que existe influencia direccional en los datos, la forma de búsqueda de vecindad ha sido una elipse, cuyos ejes mayor y menor también varían según los días. El eje mayor ha oscilado entre 9500 m y 8000 m; el eje menor entre 8000 m y 4000 m. Igualmente ha variado el ángulo hacia donde apunta el eje mayor de la elipse, que oscila entre 36° y 40°, aunque para el día 30 se ha utilizado 325° porque resultaba más ajustado a la realidad geográfica que cualquier otra opción (Tabla IV).

La bondad de ajuste permite constatar que a medida que los valores de contaminación aumentan también lo hace el error cuadrático medio (root mean square) y la media de los errores. El día 28 de junio se alcanzan valores de PM<sub>10</sub> superiores a 150 µg/m<sup>3</sup> en todas las estaciones, dando como resultado un RMS muy elevado si lo comparamos con el obtenido para el día 30 donde la contaminación es inferior a 30µg/m<sup>3</sup> (tabla IV).

**TABLA IV**  
PARÁMETROS UTILIZADOS Y BONDAD DE AJUSTE DEL MÉTODO DE INTERPOLACIÓN IDW

MODELO	PARÁMETROS	PERIODO 26-30 DE JUNIO DE 2012				
		DÍA 26	DÍA 27	DÍA 28	DÍA 29	DÍA 30
IDW anisotrópico	Nº vecinos	5/2	5/2	5/2	5/2	5/2
	Valor p	2,4	1,9	1,8	1,5	2
	Vecindad de búsqueda	Elipse 4 partes, 45°, 8000/7500	Elipse 4 partes, 45°, 8000/4000	Elipse 4 partes, 45°, 9000/4500	Elipse 4 partes, 45°, 9500/4000	Elipse 4 partes, 45°, 9000/8000
	Ángulo	37	36	36	40	325
	Bondad de ajuste	Media errores (mean error)	3,26	4,44	7,06	5,48
	Error cuadrático medio (RMS)	6,77	14,06	24,26	20,09	4,43

Fuente: Elaboración propia

Si cotejamos los estadísticos descriptivos de los datos observados de contaminación con los estimados por el modelo de interpolación se percibe que el ajuste es muy bueno (tabla V). Los valores máximos coinciden plenamente, si bien en los mínimos se produce una cierta diferencia que se explica porque al recortar la capa interpolada por la AUP, las estaciones limítrofes al municipio de Madrid, que registran cifras más bajas, son excluidas. Este hecho también se refleja en unos mayores valores medios, sin embargo, la desviación típica es menor.



**TABLA V**  
ESTADÍSTICOS DESCRIPTIVOS DE PM<sub>10</sub> DE DATOS OBSERVADOS Y ESTIMADOS

DÍAS	VALORES	MÁX.	MÍN.	MEDÍA	DES. TÍPICA
26	Obs.	59	27	46	8,85
	Estima.	58,99	35,52	49,47	4,5
27	Obs.	115	66	96,29	16,21
	Estima.	114,99	74	102,62	7,55
28	Obs.	166	88	142,94	25,19
	Estima.	165,99	109,52	152,56	9,2
29	Obs.	136	64	111,67	23,12
	Estima.	135,99	83,61	121,08	9,55
30	Obs.	28	15	21,67	3,68
	Estima.	27,99	17,01	22,44	1,69

Fuente: Elaboración propia

### III.2.3. Análisis del patrón espacial de PM<sub>10</sub> durante los días 26 a 30 de junio de 2012

Como resultado del modelado de la concentración media diaria de PM<sub>10</sub> se han obtenido cinco mapas en los cuales la distribución espacial del contaminante varía de un día a otro en función de cómo ha ido aumentando la concentración de partículas a la atmósfera, lo que ha motivado que la construcción de los intervalos se haya realizado con una amplitud diferente según los días.

El mapa del día 26 de junio muestra un patrón espacial con una clara diferenciación entre una zona con colores verdes, donde la inmisión de PM<sub>10</sub> es inferior a 50 µg/m<sup>3</sup> y otra zona con colores rosáceos donde se supera ese valor límite de protección a la salud humana fijado por la legislación europea y española (figura 6). La superficie de ésta última representa el 47,2% de la AUP, donde se puede establecer una distinción entre una zona central, en torno a los distritos de Tetúan, Chamberí, Salamanca y Centro, con valores que fluctúan entre 55 µg/m<sup>3</sup> y 58,99 µg/m<sup>3</sup> y una corona en torno a este sector central que se prolongan por el sureste (Moratalaz) y por el sur-suroeste (Arganzuela, Usera y Carabanchel), con cifras entre 50 y 55 µg/m<sup>3</sup>. La superficie por debajo de 50 µg/m<sup>3</sup> alcanza el 52,8% y se extiende por las zonas periféricas de la AUP, principalmente por Fuencarral-El Pardo al norte, por Hortaleza y Barajas al noroeste, Villaverde y Vallecas al sur-sureste y Aravaca-Moncloa al oeste. Este día comienza la llegada de la masa de aire sahariano con viento de componente sur que arrastra partículas de polvo hasta la región, a las que hay que sumar las partículas procedentes del tráfico que de manera habitual predominan donde hay mucha circulación de vehículos.

El día 27 de junio aumenta la concentración de PM<sub>10</sub> en la atmósfera, arrastradas por vientos de mayor velocidad y procedencia SSW. Todo el espacio urbano poblado (AUP) incumple el límite legal. El 80,6% de la AUP tiene valores medios diarios entre 95 µg/m<sup>3</sup> y 115 µg/m<sup>3</sup> y el 19,4% entre 74 y 95 µg/m<sup>3</sup>. Se trata de un día de contaminación severa con unos máximos que se sitúan en los distritos centrales y se prolongan hacia el sur y sureste, para después disminuir de manera generalizada hacia la periferia de la ciudad en todas direcciones (figura 7).

En el día 28 (figura 8) la inmisión de PM<sub>10</sub> empeora, alcanzándose los máximos valores de todo este periodo de severa contaminación. El 72,4% de la AUP registra valores por encima de 150 µg/m<sup>3</sup> y otro 23,6% entre 130 y 150 µg/m<sup>3</sup>. Aunque la masa de aire cálido procedente del norte de África se desplaza hacia el este, siguen llegando vientos de componente SSW a nuestra región que traen partículas en suspensión. Además, la subsidencia anticiclónica en las capas altas de la atmósfera

impide la dispersión de las partículas y favorece su persistencia en el aire.

En el día 29 se produce ya una disminución en las concentraciones atmosféricas de PM<sub>10</sub> respecto al día anterior, aunque siguen siendo elevadas, y se incumple la normativa en todo el espacio urbano. El 67,7% de la AUP con valores entre 120 y 136 µg/m<sup>3</sup> ocupa una gran mancha central de color rojo oscuro y desde ahí los valores disminuyen hacia la periferia, reflejados en unos tonos rojos cada vez más claros (figura 9).

El día 30 hay un cambio atmosférico radical, consecuencia de un tipo de tiempo diferente. La masa cálida de aire africano se ha desplazado al Mediterráneo y llega a nuestra región otra masa de aire atlántico sin partículas, con vientos más húmedos y más frescos que producen una bajada generalizada de las temperaturas (figura 10). Las máximas no superan los 30°C y las mínimas bajan de 20°C (tabla III).

Los colores rojos de los mapas de los tres días anteriores son sustituidos por colores verdes que indican que en toda el área urbana poblada la concentración media diaria está por debajo de 50 µg/m<sup>3</sup>, valor límite diario para la protección de la salud humana establecido por la directiva europea y española, incluso no se superan los 30 µg/m<sup>3</sup>. La superficie con cifras más elevadas, entre 24,5 y 27,99 µg/m<sup>3</sup>, representa el 9%. Comprende un espacio que se extiende desde Plaza Castilla por el Paseo de la Castellana hasta Chamberí; Moratalaz y una pequeña área en torno a Sanchinarro y Farolillo. El 91% de la AUP registra valores entre 17 y 24,5 µg/m<sup>3</sup>. Este patrón refleja la situación normal de distribución de PM<sub>10</sub>, es decir cifras más altas donde hay más tráfico y menores valores en zonas periféricas como Casa de Campo o Fuencarral.

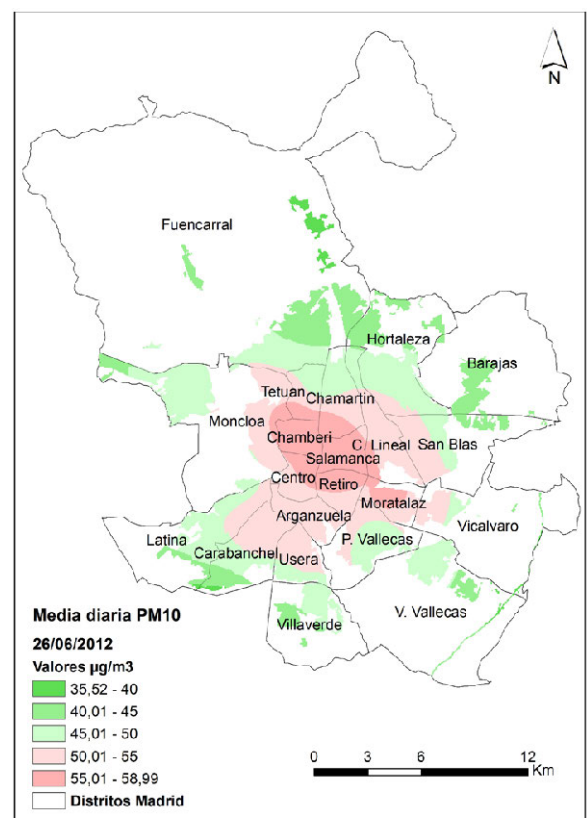


Figura 6. Distribución espacial de PM<sub>10</sub> el 26 de junio de 2012  
Fuente: Elaboración propia

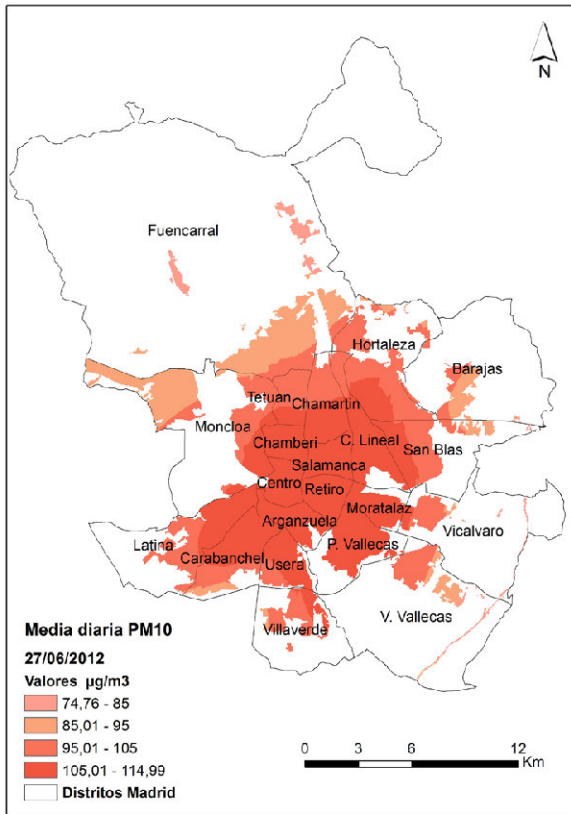


Figura 7. Distribución espacial de PM10 el 27 de junio de 2012  
Fuente: Elaboración propia

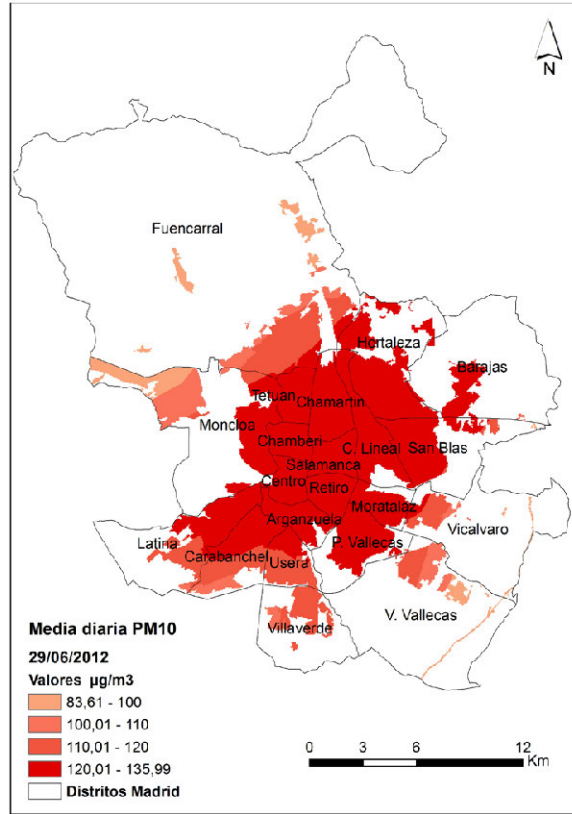


Figura 9. Distribución espacial de PM10 el 29 de junio de 2012  
Fuente: Elaboración propia

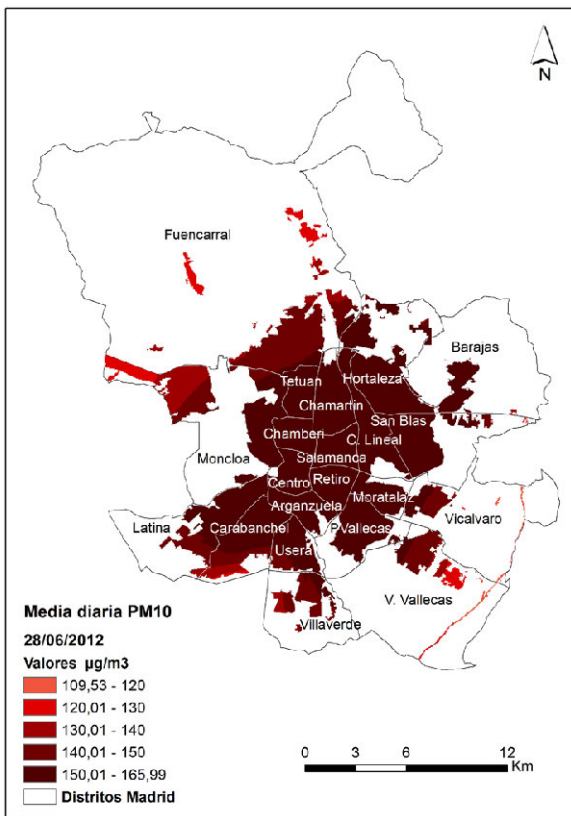


Figura 8. Distribución espacial de PM10 el 28 de junio de 2012  
Fuente: Elaboración propia

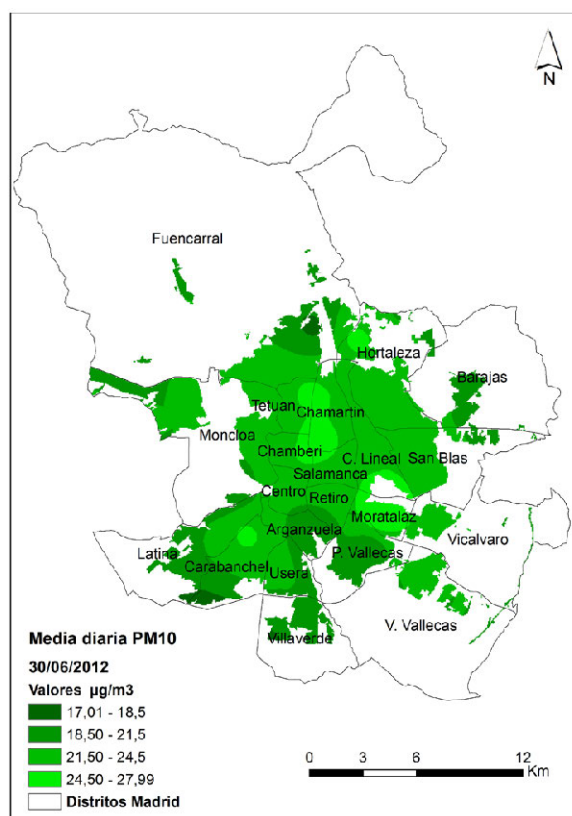


Figura 10. Distribución espacial de PM10 el 30 de junio de 2012  
Fuente: Elaboración propia

#### IV. CONCLUSIONES

Por la fuerte concentración humana en las ciudades, el deterioro que su medio ambiente exhibe y los intensos impactos que se están constatando en muchas de ellas, la calidad del aire urbano está siendo objeto de atención preferente gubernativa, social y científicamente.

Es bien conocido que la dinámica atmosférica constituye un condicionante principal de los niveles de contaminación del aire y ello se ha evidenciado en estudios realizados a escalas medias (Rodríguez et al., 2002; Querol et al., 2003) o considerando episodios singulares en ciertas ciudades (e.g. Remoundaki et al. 2011; Viana et al., 2005). Nuestro estudio se inserta en ese frente de indagación, aunque presenta dos diferencias novedosas respecto a otros.

En primer lugar, parte y se sustenta en un plan sistemático que ha buscado establecer una tipología de tipos de tiempo en la ciudad de Madrid, durante el período 2010-2015, para determinar luego los rasgos generales de polución aérea que presentaba cada uno de ellos. Tal fue el resultado de un trabajo anterior (Cañada, 2017). En la presente contribución se ha pretendido avanzar un paso más, definiendo primero los periodos de intensa y extrema contaminación por partículas (PM<sub>10</sub>) en la ciudad de Madrid durante dicho sexenio y su relación con el tipo de tiempo dominante durante los mismos, lo que permite identificar los escenarios atmosféricos singularmente críticos. De acuerdo con ello, se ha analizado la frecuencia con la que aparecen días de alta y severa contaminación por PM<sub>10</sub> en los distintos tipos de tiempo. Ello ha desvelado como especialmente proclives a alta polución los tipos de tiempo 9 (anticiclónico de verano) y 6 (anticiclónico de invierno) y a severa el tipo de tiempo 9 ya mencionado. Este hallazgo, en combinación con las previsiones de tiempo a corto plazo, posibilitaría orientar acciones preventivas generales que paliasen situaciones graves en la ciudad.

En segundo lugar, se ha estudiado un episodio, bien definido temporalmente, que resulta representativo de un tipo de tiempo que acarrea niveles severos de concentración por partículas en el aire urbano. El recurso a técnicas de interpolación espacial ha permitido desvelar la secuencia temporal de las PM<sub>10</sub> en las distintas zonas de la ciudad de Madrid durante varios días, lo que proporciona una apreciación de dónde y con qué intensidad se sufre esa atmósfera adversa.

El esfuerzo realizado en esas dos direcciones complementarias y significativas representa utilidades potenciales en dos direcciones: primero, aporta bases para plantear acciones preferentes y más intensas en aquellos ámbitos donde los niveles de polución se han mostrado más graves; y segundo, abre vías tanto para ulteriores análisis más refinados sobre impactos en la salud humana, como para aflorar desigualdades entre grupos de población y, por ende, medir discriminaciones lesivas desde el principio de justicia ambiental. Estas serán líneas en las que se espera continuar ampliando la indagación en el próximo futuro.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido realizado en el marco del proyecto de investigación "Polución del aire, poblaciones vulnerables y salud: análisis de injusticias ambientales basados en geotecnologías" (Ref. CSO2014-55535-R), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad de España. Se agradece la ayuda de Heizer González Lorenzo, Ana Mellado San Gabino y Pedro Martínez Suárez en el tratamiento de datos y preparación de resultados.

## REFERENCIAS

- AEMET (2012). Informe mensual climatológico junio 2012. Área de climatología y aplicaciones operativas, 10 pp.
- Alonso, E., Martínez, T., Cambra, K., López, L., Boldo, E., Zorrilla, B., Daponte, A., Aguilera, I., Toro, S., Iñiguez, C., Balles-ter, F., García, F., Plasencia, A., Artazcoz, L. y Medina, S. (2005). Evaluación en cinco ciudades españolas del impacto en salud de la contaminación atmosférica por partículas. Proyecto europeo Apheis. Rev. Esp. Salud Pública, 79, pp. 297-308.
- Artiñano, B., Salvador, P., Alonso, D.G., Querol, X., Alastuey, A. (2003). Anthropogenic and natural influence on the PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> aerosol in Madrid (Spain). Analysis of high concentration episodes. Environmental Pollution, 125, 3, 453-465.
- Cañada Torrecilla, M.R., Moreno Jiménez, A. y González Lorenzo, H. (2014). Modelado de la calidad del aire urbano. Un experimento metodológico con técnicas de interpolación espacial. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, nº 65, 317-342.
- Cañada Torrecilla, M.R. (2017). Clasificación de tipos de tiempo y su influencia en las concentraciones de dióxido de nitrógeno, material particulado (PM<sub>10</sub>) y ozono en la ciudad de Madrid, España. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, nº 75 (aceptado para su publicación).
- Fernández García, F. (2005). Contaminación atmosférica y calidad del aire en Madrid: análisis de las concentraciones de SO<sub>2</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, ozono y PM<sub>10</sub> (1980-2003). Estudios Geográficos, vol.56, nº 259, 507-532.
- Grigoropoulos, K.N., Nastos, P.T. y Ferentinos, G. (2009). Spatial distribution of PM<sub>10</sub> and PM<sub>10</sub> during Saharan dust episodes in Athens, Greece. Advances in Science and Research, 3, 59-62.
- Gurjar, B.R., Molina, L.T. y Ojha, C.S.P. (Eds.) (2010). Air pollution. Health and environmental impacts. New York, CRS Press. Taylor and Francis Group, 518 pp.
- Kalstein, L.S. y Corrigan, P. (1986). A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations. Annals of the Association of American Geographers, 76 (3), pp. 381-395.
- Martín Vide, J. y Olcina Cantos, J. (2001). Climas y tiempos de España. Madrid, Alianza Editorial, 258 pp.
- Querol, X., Alastuey, A., Moreno, T., Viana, M.M., Castillo, S., Pey, J., Rodríguez, S., Cristóbal, A., Jiménez, S., Pallarés, M., de la Rosa, J., Artiñano, B., Salvador, P., Sánchez, M., García, S., Herce, M.D., Fernández-Patier, R., Moreno-Grau, S., Negral, L., Minguillón, M.C., Monfort, E., Sanz, M. J., Palomo-Marín, R., Pinilla Gill, E. y Cuevas, E. (2006). Material particulado en España: niveles, composición y contribución de fuentes. Madrid CSIC y Ministerio de Medio Ambiente, 41 pp.
- Querol, X., Alastuey, A., Rodríguez, S., Viana, M.M., Artiñano, B., Salvador, P., Mantilla, E., Santos, S.G.D., Patier, R.F., Rosa, J.D.L., Campa, A.S.D.L., Menedez, M. (2003). Estudio y evaluación de la contaminación atmosférica por material particulado en España: Informes finales. IJA-CSIC, ISCIII, CIEMAT, Universidad de Huelva, Universidad del País Vasco.
- Remoundaki, E., Bourliva, A., Kokkalis, P., Mamouri, R.E., Papayannis, A., Grigoratos, T., Samara, C. y Tsezos, M. (2011). PM<sub>10</sub> composition during an intense Saharan dust transport event over Athens (Greece). Science of the Total Environment, 409, 20, 4361-4372.
- Rodríguez, S., Querol, X., Alastuey, A., Plana, F. (2002). Sources and processes affecting levels and composition of atmospheric aerosol in the Western Mediterranean. Journal of Geophysical Research, 107 (D24), 4777.
- Salvador, P., Artiñano, B., Alonso, D.G., Querol, X. and Alastuey, A. (2004). Identification and characterisation of sources of PM<sub>10</sub> in Madrid (Spain) by statistical methods. Atmospheric Environment, 38, 3, 435-447.
- Salvador, P., Artiñano, B., Querol, X. and Alastuey, A. (2008). A combined analysis of backward trajectories and aerosol chemistry to characterise long-range transport episodes of particulate matter: The Madrid air basin, a case study. Science of the Total Environment, 495-506.
- Viana, M., Pérez, C., Querol, X., Alastuey, A., Nickovic, S. y Baldasano, J.M. (2005). Spatial and temporal variability of PM levels and composition in a complex summer atmospheric scenario in Barcelona (NE Spain). Atmospheric Environment, 39, 5343-5361.

# Optimización de una red de monitoreo de precipitación usando modelos Geoestadísticos: caso de estudio en la cuenca del río Paute, Ecuador

Contreras Juan<sup>1,2</sup>, Ballari Daniela<sup>1,2,3</sup>, Samaniego Esteban<sup>1,2</sup>

1 Facultad de Ingeniería/Universidad de Cuenca  
Avenida 12 de Abril s/n, 10150  
Cuenca/Azuay/Ecuador  
juanjosecs91@gmail.com

2 Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales/ Universidad de Cuenca  
Víctor Manuel Albornoz y los Cerezos/Azuay/Ecuador  
esteban.samaniego@ucuenca.edu.ec

3 IERSE/Facultad de Ciencia y Tecnología/Universidad del Azuay  
Avenida 24 de Mayo 7-77 y Hernán Malo, 10150 Cuenca /Azuay/Ecuador  
dballari@uazuay.edu.ec

## RESUMEN

En regiones de montaña como los Andes, la densidad de la red de pluviómetros es pobre y a menudo dispersa. Por lo tanto, es incapaz de proporcionar una adecuada estimación de la precipitación, por lo que la densificación de estas redes constituye un tema de gran relevancia para una adecuada gestión ambiental y de los recursos hídricos. El presente estudio tiene como objetivo identificar el diseño óptimo para extender la red de pluviómetros existente en una cuenca de montaña en el sur del Ecuador (Cuenca del Río Paute) mediante el uso de modelos geoestadísticos. Imágenes satelitales de precipitación TRMM 3B43 e imágenes MODIS de distintas variables atmosféricas, así como variables topográficas derivadas de un Modelo Digital de Elevación (DEM), fueron utilizadas como información auxiliar para definir distintos modelos de regresión para la optimización de la red por medio de Kriging Universal (KU). Con el mejor modelo de regresión la red fue densificada, reduciendo la Varianza Media de Kriging Universal (VMKU) como función objetivo por medio del algoritmo de optimización Spatial Simulated Annealing (SSA). Con el propósito de comparar los resultados, Kriging Ordinario (KO) también fue utilizado. La red fue densificada sobre 63 puntos (42 añadidos). Con KU se obtuvo una varianza media 18% menor a KO. La varianza entre la red actual y propuesta se redujo en un 55% y un 64% con KO y KU, respectivamente. La red de diseño obtenida en el estudio permite captar adecuadamente la variabilidad espacial de la precipitación en relación a la red actual y puede ser usada como guía para la densificación paulatina de estas redes en la región.

Palabras clave: **Red de pluviómetros, modelos geoestadísticos, kriging universal, imágenes satelitales, Spatial Simulated Annealing.**

## ABSTRACT

*In mountain regions like the Andes, the density of the rain gauge network is poor and often dispersed. This situation affects the ability to provide an adequate estimation of precipitation. Therefore, the densification of these networks is an issue of great relevance for an adequate management of environment and water resources. The present study aims to identify the optimal design to extend the existing rain gauge network in a mountain basin of southern Ecuador (Paute River basin) through the use of geostatistical models. Precipitation satellite images TRMM 3B43 and MODIS images of different atmospheric variables,*

as well as topographic variables derived from a Digital Elevation Model (DEM), were used as auxiliary information to define different regression models for network optimization using Universal Kriging (KU). With the best regression model the network was densified, reducing the Mean Universal Kriging Variance (VMKU) as an objective function by means of the Spatial Simulated Annealing (SSA) optimization algorithm. In order to compare the results, Ordinary Kriging (KO) was also used. The network was densified over 63 points (42 added). With KU a mean variance 18% lower than KO was found. The variance between the current and proposed network was reduced by 55% and 64% with KO and KU, respectively. The design network obtained in the study allows to adequately capture the spatial variability of precipitation in relation to the current network and can be used as a guide for the gradual densification of these networks in the region.

**Keywords:** Rain gauge network, geostatistical models, universal kriging, satellite images, Spatial Simulated Annealing.

## I. INTRODUCCIÓN

La precipitación es el componente más importante del ciclo hidrológico y tiene un papel fundamental en diferentes actividades socioeconómicas. Por lo tanto, un conocimiento exacto de la variabilidad espacial y temporal de la precipitación es esencial para muchos campos científicos y de gestión como la hidrología, meteorología, ecología, modelación climática, planificación de riego, control y prevención de inundaciones y la gestión de los recursos hídricos (Celleri et al., 2007; Padrón et al., 2015; Shaghaghian & Abedini, 2013; Tapiador et al., 2012).

Para capturar y cuantificar la variabilidad espacial y temporal de la precipitación, pluviómetros son comúnmente instalados en un área determinada o una cuenca (Adhikary et al., 2014). Estas mediciones son posteriormente extrapoladas para obtener estimaciones promedio de la precipitación sobre un área. A pesar de los adelantos en la teledetección remota por medio de imágenes satelitales y radares meteorológicos para capturar la variabilidad de la precipitación, los pluviómetros siguen siendo la fuente más precisa de información (Michaelides et al., 2009; Tapiador et al., 2012). En regiones de montaña como los Andes, la densidad de estas redes es pobre y a menudo dispersa y, por lo tanto, incapaz de proporcionar una adecuada estimación de la precipitación. Estas estimaciones sólo mejorarán si, con el tiempo, se aumenta la densidad de la red de pluviómetros (Celleri et al., 2007; Ochoa et al., 2014). Por esto, especial atención es requerida en el diseño y densificación de estas redes.

Uno de los métodos más utilizados en el diseño y optimización de redes de pluviómetros es el método de reducción de la varianza por medio de técnicas de Kriging (Cheng et al., 2008). La principal ventaja de kriging sobre los métodos de interpolación más sencillos es que las características escasamente muestreadas de la variable objetivo pueden ser complementadas por atributos secundarios que son muestreados más densamente (Goovaerts, 2000). El creciente interés por las herramientas geoestadísticas se basa en la disponibilidad de datos secundarios o auxiliares (ej. medidas indirectas de sensores remotos) que podrían utilizarse para producir modelos espaciales/temporales fiables de diversas variables ambientales (Hengl et al., 2012).

La mayoría de estudios de diseño y optimización de redes de precipitación se han enfocado en el uso de Kriging Ordinario (ej.: Adhikary et al., 2014; Chebbi et al., 2013; Chebbi et al., 2011; Feki et al., 2016; Pardo-Igúzquiza 1998); sin embargo, pocos estudios que utilicen métodos con variables auxiliares han sido reportados. Por ejemplo, Feki and Slimani (2015) compararon tres algoritmos geoestadísticos diferentes, como kriging con deriva externa, kriging de regresión y cokriging, que integran la elevación como variable secundaria con el objetivo de encontrar procedimientos eficientes para la optimización de la

red de precipitación. Ellos encontraron que el kriging de regresión fue el mejor modelo. Por otra parte Ge et al. (2014) diseñaron una red de monitoreo ecohidrológico mediante un muestreo multicriterio con el uso de cokriging universal. Ellos diseñaron la red para el monitoreo simultáneo de la precipitación, temperatura y humedad del suelo definiendo variogramas para cada variable mediante información satelital y variables auxiliares derivadas de un modelo digital de elevación. Encontraron que, comparado con un diseño de muestreo que no tiene en cuenta la correlación multivariada y la tendencia espacial, el método de muestreo utilizado redujo la varianza del error de predicción y fue eficiente en capturar la variación espacial de las variables objetivo.

En regiones poco monitoreadas como los Andes en Ecuador, conocer la estructura espacial de la precipitación por medio de mediciones in-situ es muy difícil debido a la poca densidad de pluviómetros y a una distribución dispersa de los mismos. La incorporación de variables auxiliares o explicativas con una cobertura espacial continua relacionadas con la precipitación sin duda es una alternativa fiable para un diseño más preciso de estas redes. Campozaño et al. (2016) ha reportado la gran utilidad de imágenes satelitales de nubosidad para identificar procesos de generación y el estudio espacio-temporal de la precipitación en terrenos complejos, como los Andes. Hasta el momento no existen estudios relacionados que utilicen información auxiliar a partir de productos satelitales de variables atmosféricas en la optimización de redes de precipitación. De esta manera, el objetivo de este estudio es densificar la red de precipitación existente en una cuenca Andina en el sur del Ecuador, la Cuenca del río Paute, mediante el uso de información auxiliar de variables atmosféricas además de variables topográficas y geográficas relacionadas con la variabilidad de la precipitación por medio de Kriging Universal. Con el propósito de comparar y resaltar la ventaja de utilizar variables auxiliares en la densificación de la red, Kriging Ordinario fue utilizado.

## II. MÉTODO

### ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es la cuenca del río Paute (Figura 1). La cuenca del Paute está ubicada entre la cordillera oriental y occidental de los Andes en Ecuador y tiene un área de 6.481 km<sup>2</sup>. Su rango de elevación varía de 442 a 4.415 m.s.n.m. y alrededor del 40% de la cuenca está cubierta por páramo. El patrón climático en la región de estudio está influenciado por el régimen costero del Pacífico desde el oeste, y las masas de aire del Atlántico continental y tropical del este (Vuille et al., 2000). La cuenca se caracteriza por una alta variación espacial y temporal de la precipitación que puede clasificarse en tres regímenes pluviales, subregiones con un patrón de precipitación

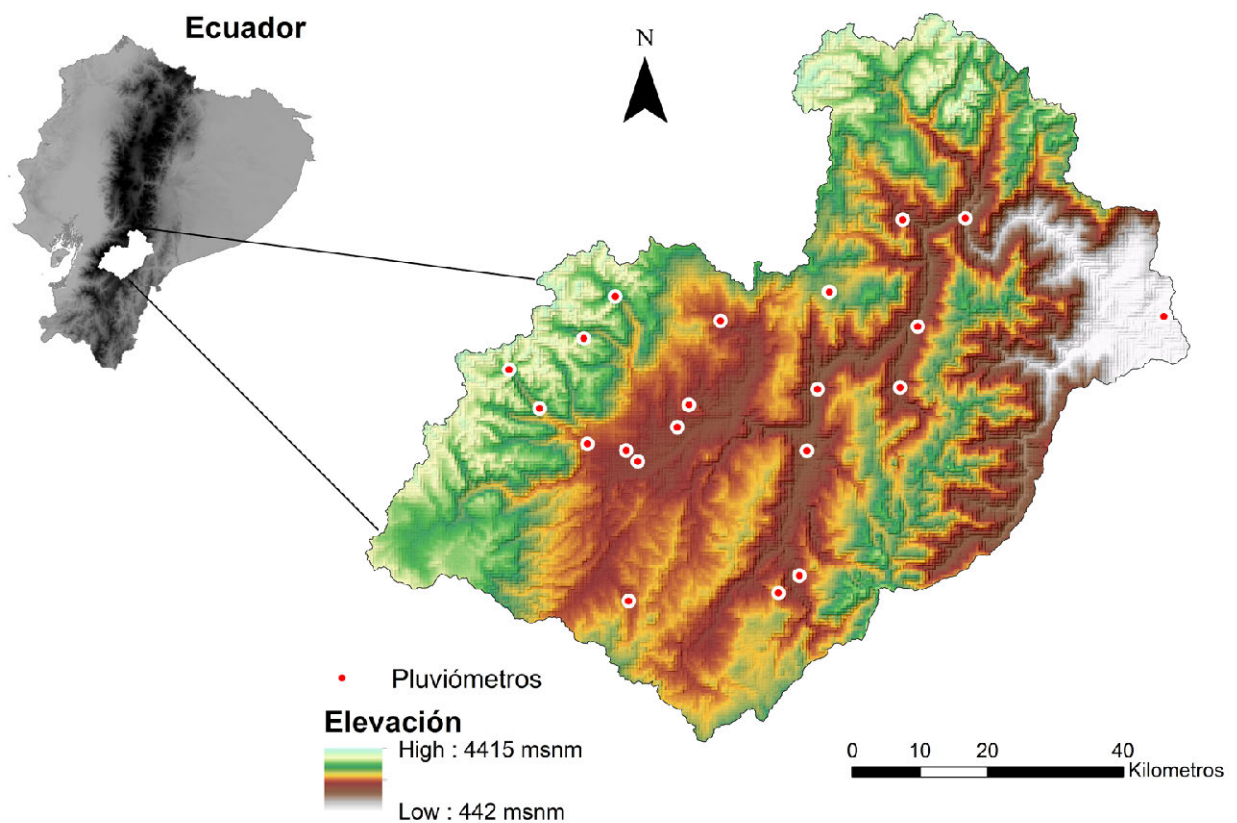


Figura 1. Ubicación del área de estudio y de la red de monitoreo de precipitación del INAMHI.

uni-, bi- y trimodal (Campozano et al., 2016; Celleri et al., 2007). La cuenca del río Paute alimenta varias centrales hidroeléctricas, Amaluza (1075 MW), El Labrado y Chanlud (38,4MW), Mazar (162,6 MW) y Sopladora (500 MW), generando alrededor del 40% de la producción hidroeléctrica del Ecuador. Además, varias ciudades de la región dependen directamente de los diversos servicios ecohidrológicos de la cuenca.

La Cuenca del Río Paute es una de las cuencas más monitoreadas de Ecuador debido a su importancia en la producción de energía hidroeléctrica. Actualmente, varias instituciones públicas a nivel nacional y local entre ellas principalmente el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y la Empresa de Telecomunicaciones Agua Potable y Alcantarillado de la ciudad de Cuenca (ETAPA EP) cuentan con redes de monitoreo de precipitación en la región. Estas redes, sin embargo, se encuentran dispersas de manera desigual por todo el territorio por lo que no existe una representación completa de la precipitación en toda la cuenca.

Para este estudio, la densificación de la red de monitoreo se realizó tomando en cuenta la red de pluviómetros existentes del INAMHI (Figura 1) debido a que es la red más extensa y de mayor antigüedad de la región, contando con 21 pluviómetros en la cuenca.

#### DATOS

##### *Datos satelitales de precipitación*

Debido a que el número de pluviómetros en la región es limitado, no es posible obtener una representación completa de la variabilidad espacial de la precipitación, por lo que los datos de precipitación obtenidos de imágenes satelitales con una cobertura espacial y temporal continua fueron utilizados. Los

datos de precipitación fueron obtenidos de la de la Misión de Observación de Precipitación Tropical (Tropical Rainfall Measuring Mission - TRMM), un proyecto conjunto lanzado por la NASA y la agencia espacial Japonesa JAXA diseñado para el monitoreo y estudio de la precipitación en zonas tropicales (1997-2015). TRMM estuvo compuesto por varios instrumentos de medición de precipitación, tales como el Radar de Lluvia (PR), el Generador de Imágenes por Microondas TRMM (TMI) y el Escáner de Radiación Visible e Infrarrojo (VIRS). La información de estos instrumentos se procesan con algoritmos de recuperación para generar estimaciones de precipitación a una escala cuasi-global (Condom et al. 2010). La precipitación es obtenida a una resolución espacial de 0.25° (aproximadamente 27 x 27 km a latitud de 0°) para áreas 50°N-50°S por medio del TRMM Análisis de Precipitación Multi-Satélite (TMPA), que fue diseñado para combinar estimaciones de precipitación de varios sistemas de satélites, así como de datos de precipitación en tierra cuando estos estuvieran disponibles (Huffman et al., 2007).

Para el estudio, datos mensuales de precipitación TRMM 3B43 durante el período Enero 2001 a Diciembre 2011 (120 imágenes) fueron descargados de la plataforma Giovanni de la NASA (<https://giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/>) y geo referenciados para el área de estudio. Las imágenes satelitales TRMM fueron reescaladas a una resolución de 5 km con el método de vecinos más cercanos (Mahmud et al., 2015). Este cambio de resolución espacial se justifica por el uso posterior de variables auxiliares de mejor resolución espacial. Posteriormente, las imágenes satelitales fueron promediadas mensualmente durante el período de estudio para finalmente obtener la precipitación anual en el área acumulando los 12 conjuntos de datos mensuales. En la Tabla I se presentan los estadísticos de la precipitación anual durante el período de estudio.

**TABLA I**  
ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LA PRECIPITACIÓN PROMEDIO ANUAL EN LA CUENCA DEL RÍO PAUTE CAPTADA POR LA IMAGEN TRMM.

PROMEDIO	MÁXIMA	MÍNIMA	MEDIANA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
1127.1 mm	1735.4 mm	709.9 mm	1095.7 mm	235.8 mm

*Variables auxiliares*

Con el objetivo de representar de mejor manera los patrones espaciales de la precipitación en el área de estudio, variables geográficas, topográficas, y atmosféricas relacionadas con la precipitación a una resolución más fina fueron utilizadas en el estudio para el diseño de la red de pluviómetros. A continuación se detallan los diferentes productos satelitales utilizados.

- Variables geográficas: Latitud y longitud.
- Variables topográficas: Datos de un Modelo Digital de Elevación (DEM) fueron obtenidos del proyecto Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), patrocinado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) y la NASA. El DEM fue descargado a una resolución espacial de 90 m de la página web <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/dataprod.htm> y posteriormente reescalado a una resolución de 5 km mediante el método de vecinos más cercanos (Bostan et al., 2012). Parámetros topográficos como la elevación, el aspecto y la pendiente fueron derivados del DEM (Fig. 2a-c).
- Variables atmosféricas: Varios productos satelitales MODIS

(MOD06\_L2 y MOD\_08) fueron descargados a una resolución de 5 km para obtener mediciones mensuales de varios parámetros atmosféricos. La fracción de nubes (FN), la temperatura en la parte superior de las nubes (TSN) y el vapor de agua en la atmósfera (VAA) fueron considerados para el análisis (Fig. 2d-f). Las imágenes fueron descargadas de la página web <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/>.

Al igual que las imágenes de precipitación, las imágenes satelitales de todas las variables auxiliares antes mencionadas a excepción de las variables topográficas fueron descargadas a una resolución mensual durante Enero 2001 - Diciembre 2011. Estas imágenes fueron promediadas mensualmente durante el período de estudio. Posteriormente, una imagen a escala anual de cada variable fue obtenida promediando los 12 conjuntos de datos mensuales. En la Figura 2 se muestra el mapa de las variables auxiliares utilizadas en el estudio.

MÉTODOS

*Análisis de regresión*

Con el objetivo de definir relaciones entre la precipitación y las diferentes variables ambientales, modelos de regresión lineal simple fueron establecidos entre la imagen anual de precipitación TRMM y cada una de las variables auxiliares a una resolución de 5 km. Las variables con una correlación mayor a 0.3 y un valor de significancia del 95% ( $p < 0.05$ ) fueron posteriormente analizadas para definir y evaluar modelos de regresión lineal múltiple como modelos de predicción para la red de diseño. El análisis de regresión simple y múltiple fue realizado en R.

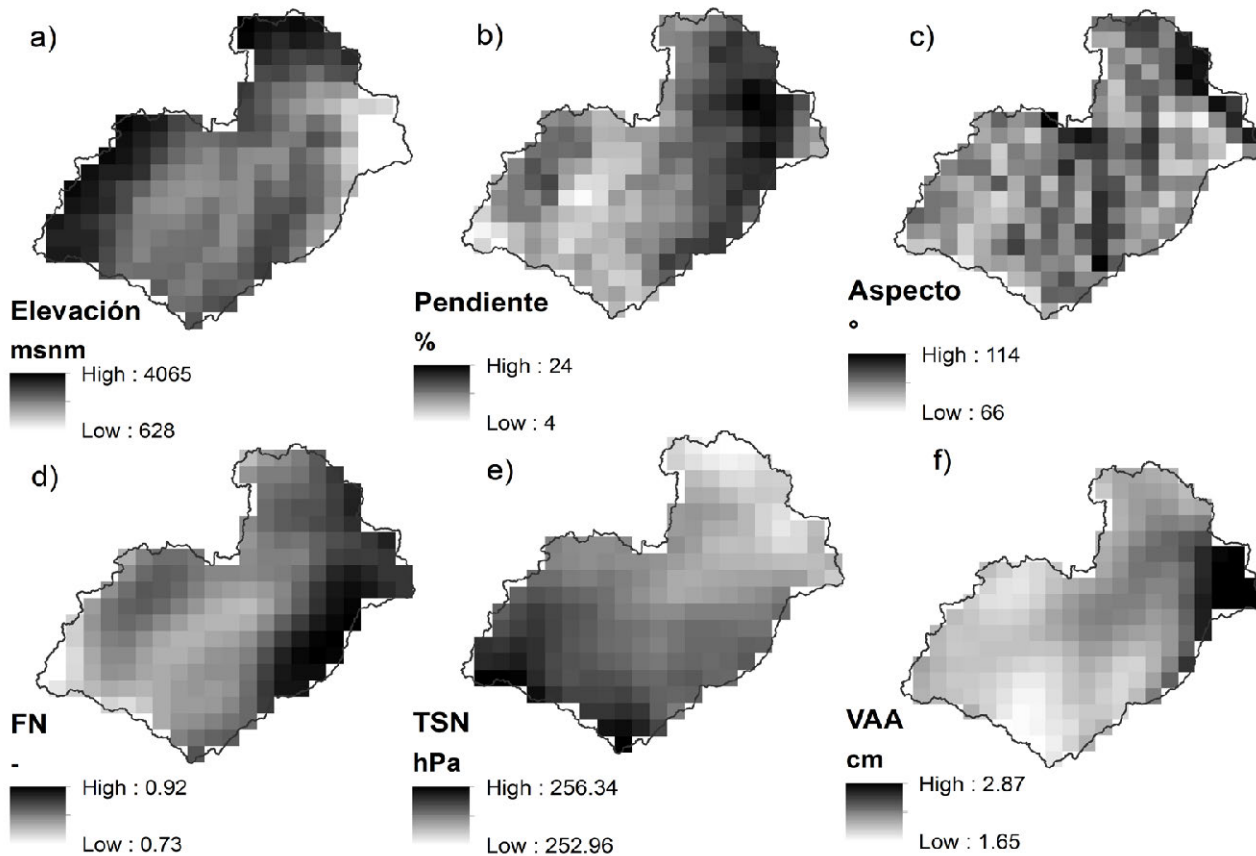


Figura 2. Mapa de las variables auxiliares utilizadas en el estudio a una resolución de 5 km x 5 km: a) elevación, b) pendiente, c) aspecto, d) FN: fracción de nubes, e) TSN: temperatura superior en las nubes y f) VAA: vapor de agua en la atmósfera.



## MUESTREO ESPACIAL

### Técnicas de interpolación

El muestreo espacial aquí utilizado se basa en dos métodos de interpolación geoestadísticos que no son nuevos y que se han descrito con frecuencia en la literatura. Por lo tanto, aquí se realiza una breve descripción de los mismos. El lector puede referirse a Hengl (2009) para más información.

### Kriging Ordinario (KO)

Las estimaciones de Kriging Ordinario son una media ponderada de las observaciones, con pesos derivados del grado de correlación espacial. La estimación KO es un promedio ponderado lineal de las  $n$  observaciones disponibles definidas como:

$$\hat{Z}(s) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i) \quad (1)$$

donde  $Z(s)$  es la estimación de KO en la posición  $s$ ,  $\lambda_i$  son los pesos de KO, y  $s_i$  son los lugares de observación. En KO, los pesos se obtienen de tal manera que la varianza de error de predicción se minimiza sujeto a la imparcialidad (es decir, los pesos de kriging se limitan a sumar a uno). La varianza del error de predicción ( $\sigma_{KO}^2$ ) se define en la Ec. (2) como:

$$\sigma_{KO}^2(s_0) = E \left[ \left( \hat{Z}(s_0) - (s_0) \right)^2 \right] \quad (2)$$

donde  $E$  es la esperanza matemática.

### Kriging Universal (KU)

En KU, la distribución espacial de la variable objetivo se describe mediante la suma de una tendencia determinista, modelada por una regresión lineal sobre covariables, y la realización de un residuo estocástico, espacialmente autocorrelacionado. La predicción de KU es dada por la siguiente ecuación:

$$\hat{Z}(s) = \sum_{j=0}^n B_j x_j(s) + \varepsilon(s) \quad (3)$$

donde  $Z(s)$  es la variable ambiental objetivo,  $s \equiv (s_1, s_2)'$  es una coordenada espacial bidimensional, donde las  $x_j(s)$  son covariables (observe que  $x_0(s) \equiv 1$  para todo  $s$ ), donde  $B_j$  son coeficientes de regresión, y donde  $\varepsilon(s)$  es un residuo normalmente distribuido con media cero y varianza constante  $c(0)$ . El residual  $\varepsilon$  está posiblemente autocorrelacionado espacialmente, cuantificado mediante una función de auto covarianza o un variograma.

En notación de matriz la ecuación (Ec. 3) se puede reescribir como:

$$\hat{Z}(s) = x'(s)\beta + \varepsilon(s) \quad (4)$$

donde  $x$  y  $\beta$  son vectores de columna de  $m+1$  covariables y  $m+1$  coeficientes de regresión, respectivamente. La predicción de KU en una posición no observada  $s_0$  de  $n$  observaciones  $z(s_i)$  está dada por:

$$\hat{Z}(s_0) = (c_0 + X(X'C^{-1}X)^{-1}(x_0 - X'C^{-1}c_0))'C^{-1}z \quad (5)$$

donde  $X$  es la matriz  $n \times (m+1)$  de covariables en los lugares de observación,  $x_0$  es el vector de covariables en la localización de predicción,  $C$  es la matriz de varianza-covarianza  $n \times n$  de los  $n$  residuos,  $c_0$  es el vector de covarianzas entre los residuos en las posiciones de observación y predicción, y donde  $z$  es el vector de observaciones  $z(s_i)$ .  $C$  y  $c_0$  se derivan del variograma de  $\varepsilon$ .

La varianza del error de predicción universal (varianza de KU) en  $s_0$  está dada por:

$$\sigma^2(s_0) = c(0) - c_0' C^{-1} c_0 + (x_0 - X' C^{-1} c_0)' (x_0 - X' C^{-1} c_0) \quad (6)$$

La varianza de kriging universal incorpora tanto la varianza del error de predicción del residuo como la varianza del error de estimación de la tendencia. Mediante la minimización del promedio espacial (o suma) de la varianza de kriging universal en los puntos, se obtiene automáticamente el equilibrio correcto entre la optimización del patrón de muestra en el espacio geográfico y de atributos (Brus & Heuvelink, 2007).

### Análisis de variograma

Un requerimiento importante para aplicar técnicas de kriging es conocer la estructura espacial de la variable objetivo, la cual es definida por el variograma o semivariograma. De esta manera los semivariogramas (experimental y ajustado) de los modelos de regresión múltiple para KU y otro para KO fueron definidos a partir de las imágenes satelitales a una resolución de 5 km (Figura 2) por medio de la librería "gstat" en R (Pebesma, 2004). Los modelos de variograma exponencial, gaussiano y esférico fueron evaluados debido a que son los más utilizados en hidrología (Adhikary et al., 2014).

### Función objetivo

El diseño de la red de pluviómetros requiere buscar una combinación entre todas las estaciones de medición que minimice la varianza de estimación y/o maximice el contenido de información de los datos observados. Esto se logra mediante el posicionamiento óptimo de estaciones redundantes o adicionales. En este estudio, la reducción de las Varianzas Medias de Kriging Ordinario (VMKO) (Ec. 2) y de Kriging Universal (VMKU) (Ec. 6) fueron consideradas como funciones objetivos como un indicador para lograr la red óptima. El principio subyacente es que el posicionamiento óptimo de estaciones adicionales en zonas de alta varianza reducirá el error de kriging en la red y por lo tanto mejorará el rendimiento de la red. Aplicando este principio repetidamente, se puede llegar a una combinación óptima entre las estaciones existentes y adicionales que producen un alto rendimiento de la red, encontrando así la red de pluviómetros óptima.

### Optimización del muestreo

Para la optimización Spatial Simulated Annealing (SSA) fue usado en este estudio. SSA es un algoritmo que usa ligeras perturbaciones de diseños previos y una técnica de búsqueda aleatoria para resolver problemas de optimización espacial (Chebbi et al., 2011; Ge et al., 2014; Melles et al., 2011; Pardo-Igúzquiza, 1998). Este algoritmo combinatorio iterativo tiene cinco pasos (Baume et al., 2011):

1. Comenzar con un diseño inicial arbitrario y calcular la función objetivo seleccionada (VMKO o VMKU);
2. Calcular un nuevo diseño candidato del diseño actual por perturbaciones aleatorias de las ubicaciones de uno o varios sitios de medición;
3. Evaluar el nuevo diseño candidato con la función objetivo;
4. Aceptar el nuevo diseño cuando la función objetivo ha mejorado, o aceptar el mismo con alguna probabilidad cuando la función objetivo se ha deteriorado (esto asegura que el algoritmo escape de óptimos locales);
5. Detener cuando se ha alcanzado un número grande de iteraciones o cuando no se han aceptado nuevos diseños de candidatos para un número dado de veces.

Varios parámetros del algoritmo SSA deben ser definidos antes del proceso de optimización. La probabilidad inicial de aceptar diseños empeorados fue establecida en 0.2 ( $p < 20\%$ ) para evitar la selección de óptimos locales. Otro parámetro a ser configurado es el 'cooling schedule', que hace referencia a la tasa con que  $p$  disminuye a cero. Para el estudio,  $p$  fue configurado a una función de disminución exponencial de acuerdo al número de iteraciones. Todos los parámetros del algoritmo fueron configurados según estudios previos realizados por Brus and Heuvelink (2007) y Melles et al. (2011). Las simulaciones se realizaron mediante el uso de la función optimizeNetwork del paquete "IntamapInteractive" disponible en R.

#### Implementación de la red densificada

**Selección del modelo de variograma:** Para la densificación de la red un modelo de variograma fue seleccionado entre los diferentes modelos de regresión múltiple definidos. El modelo de variograma utilizado fue el que menor semivarianza presentó en el análisis realizado por medio del semivariograma experimental.

**Selección del número de estaciones:** Para determinar el número óptimo de pluviómetros requerido en la cuenca del Paute, se investigó la relación entre el número de puntos de muestreo y el correspondiente valor de la función objetivo por medio de KO (considerando el peor escenario de optimización, sin variables auxiliares). Este análisis se lo realizó optimizando la red agregando puntos de monitoreo de 10 en 10 partiendo de la red actual hasta llegar a los 120 puntos por medio de SSA. La optimización de cada muestra fue realizada sobre 1000 iteraciones considerando toda el área de la cuenca. El número óptimo se estableció cuando VMKO se estabilizó a pesar del aumento de pluviómetros.

**Restricciones por accesibilidad:** Un aspecto importante a considerar al realizar el diseño de la red es tener en cuenta las limitaciones de acceso para realizar monitoreo ambiental en regiones montañosas y de difícil acceso. Por esta razón y con el fin de facilitar la instalación, el mantenimiento y la recolección de datos de los equipos se estableció un buffer de 1 km alrededor de las vías para delimitar posibles lugares dónde se podrían ubicar los nuevos puntos de monitoreo (Figura 3). Bajo estas consideraciones se determinó que aproximadamente el 61% del área de la cuenca cuenta con zonas de fácil acceso (cercanas a vías) sobre las cuales se realizó la densificación de la red (Figura 3).

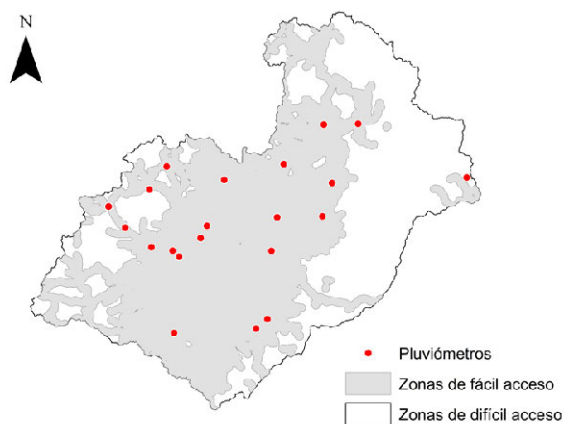


Figura 3. Zonas accesibles para la instalación de nuevos puntos de monitoreo de precipitación. Una vez definidos los puntos anteriores la red de monitoreo fue optimizada sobre 10000 iteraciones.

### III. RESULTADOS

#### ANÁLISIS DE REGRESIÓN

Los resultados del análisis de regresión se presentan en la Tabla II y muestran el porcentaje de varianza en la precipitación que es explicado por cada variable ( $R^2$ ). En general, las variables geográficas y atmosféricas tuvieron resultados similares y este fue mejor que las variables topográficas. Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) de las variables geográficas variaron de 0.511 a 0.015, las variables atmosféricas variaron de 0.514 a 0.067 y las variables topográficas variaron entre 0.444 y 0.04. Se encontraron mayores valores de  $R^2$  para la FN, la longitud y la elevación, mientras que los menores valores fueron encontrados para la latitud, el aspecto y la TSN. Todas las variables pasaron la prueba de significancia a excepción de la latitud y el aspecto.

TABLA II  
RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE REGRESIÓN SIMPLE ENTRE LA PRECIPITACIÓN ANUAL Y LAS VARIABLES AUXILIARES EN LA CUENCA DEL RÍO PAUTE.

VARIABLES		$R^2$
Geográficas	Longitud	0.511*
	Latitud	0.0145
Topográficas	Elevación	0.444*
	Pendiente	0.341*
	Aspecto	0.0049
Atmosféricas	FN	0.514*
	VAA	0.357*
	TSN	0.067*

Nota: \* indica que la variable tiene un nivel de significancia de  $p < 0.05$ ; las variables en cursiva fueron excluidas del análisis multivariado.

Con las variables topográficas y atmosféricas que presentaron un valor de  $R^2$  mayor a 0.3 (Tabla II) se realizó un análisis de regresión entre estos dos conjuntos de variables auxiliares con el fin de establecer de mejor manera las relaciones entre la precipitación y más de una variable auxiliar (multicolinealidad). Las correlaciones que se muestran en la Tabla III indican que existe una mayor correlación entre la elevación y el VAA, la FN y la pendiente, y entre la FN y el VAA. De esta manera, 3 modelos de regresión múltiple fueron establecidos con la precipitación: precipitación + elevación + VAA + longitud ( $R^2 = 0.571$ ), precipitación + FN + pendiente + longitud ( $R^2 = 0.547$ ), y precipitación + FN + VAA + longitud ( $R^2 = 0.568$ ). La longitud ( $R^2 = 0.51$ ,  $p < 0.05$ ) fue incluida en los 3 modelos de regresión múltiple debido a que en estudios previos se ha evidenciado que las variables geográficas tienen una influencia importante en la variabilidad de la precipitación en la zona de estudio (Buytaert et al., 2006).

#### ANÁLISIS DE VARIOGRAMA

En la Figura 4 se muestra el variograma experimental de cada modelo y en la Tabla IV sus respectivos parámetros. En la Figura 4 se observa una disminución clara de la semivarianza al usar los diferentes modelos que incluyen variables auxiliares. Lo que a priori indica una mejora en la reducción de la varianza al aplicar estos modelos sobre KO. La Tabla IV indica que los modelos de regresión múltiple se ajustan a un modelo exponencial y que todos los parámetros de los diferentes modelos varían. Con el propósito de usar el mejor modelo de predicción, KU3 (precipitación + VAA + FN + longitud) fue seleccionado para la densificación de la red debido a que presentó una menor semivarianza en el variograma experimental en comparación a los otros modelos como se observa en la Figura 4.

**TABLA III**  
VALORES DE R<sup>2</sup> ENTRE LAS VARIABLES TOPOGRÁFICAS Y ATMOSFÉRICAS EN LA CUENCA DEL RÍO PAUTE.

	ELEVACIÓN	PENDIENTE	FN	VAA
Elevación	1			
Pendiente	0.03	1		
FN	0.12	<b>0.53</b>	1	
VAA	<b>0.54</b>	0.25	<b>0.31</b>	1

Nota: las relaciones entre las variables en negrita y cursiva fueron utilizadas para establecer modelos de regresión múltiple con la precipitación. Todas las relaciones obtuvieron un valor de p < 0.05.

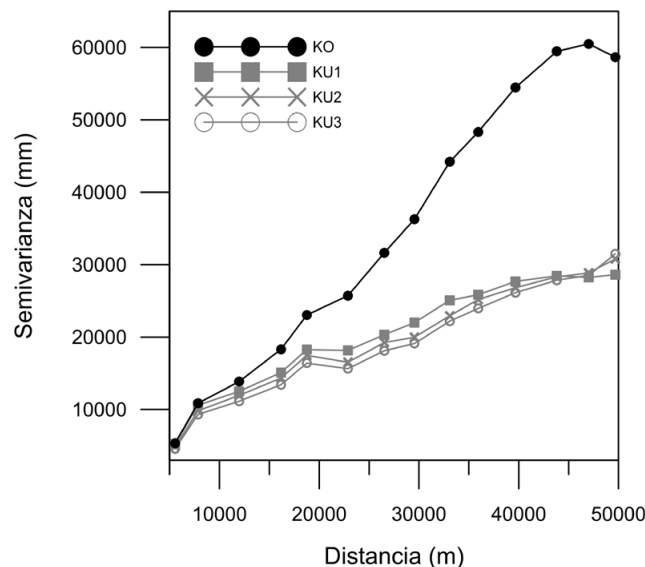


Figura 4. Semivariograma experimental de los diferentes modelos de regresión derivados de las imágenes satelitales.

**TABLA IV**  
PARÁMETROS DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE AJUSTADOS AL VARIOGRAMA EXPERIMENTAL.

VARIABLES	CÓDIGO	MODELO	NUGGET	SILL	RANGE
Precipitación	KO	Gausiano	5059	62145	33213
Precipitación+ elevación+ VAA+longitud	KU1	Exponencial	0	35028	27736
Precipitación+ pendiente+FN +longitud	KU2	Exponencial	0	35732	30964
Precipitación+ VAA+FN+ longitud	KU3	Exponencial	157	37727	36609

**DISEÑO DE LA RED DENSIFICADA DE PRECIPITACIÓN**

En la Figura 5 se observa el valor de la VMKO para varios conjuntos de pluviómetros. Se encontró que la varianza disminuye con el aumento en el número de puntos. Cuando el número de puntos alcanzó los 60 aproximadamente, la disminución en la varianza media del error de predicción de KO no disminuyó substancialmente. De esta manera, se estableció un equilibrio entre el número de pluviómetros requeridos y la función objetivo. El total de pluviómetros requeridos cumple con las recomendaciones establecidas por la Organización Meteorológica Mundial (WMO) donde en regiones de montaña se requiere un pluviómetro por cada 100 km<sup>2</sup> aproximadamente para una adecuada captura de la variabilidad espacial de la precipitación (WMO, 1994, 2008).

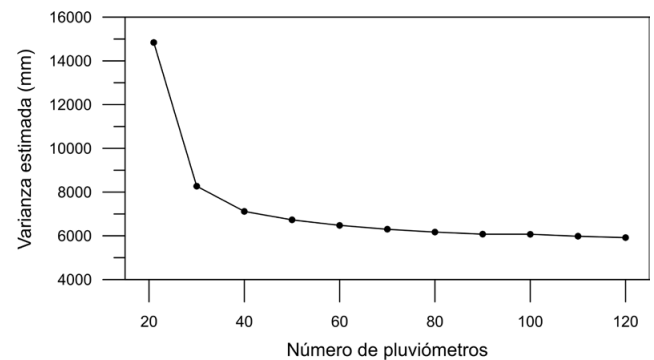


Figura 5. Balance entre la función objetivo (VMKO) y el número de pluviómetros.

Con el objetivo de densificar la red en dos fases, se estableció un número total de 63 pluviómetros requeridos en el área de estudio de los cuales 42 fueron añadidos a la red existente de 21. La densificación de la red se realizó: a) duplicando la red existente, es decir añadiendo 21 puntos a la red actual y b) triplicando la red existente añadiendo 21 puntos más a la red identificada en a. En la Figura 6 se muestra la ubicación de los nuevos puntos de muestreo obtenidos mediante la optimización con KO y KU. Se puede observar que tanto la red de muestreo identificada mediante la disminución de la varianza de KO y KU muestran un patrón similar con una distribución de los sitios por todo el territorio priorizando la cercanía a la red de vías; sin embargo, algunos de los sitios identificados con KO tendieron a localizarse en los bordes de la cuenca no así con KU.

En la Tabla V se muestra el valor de la varianza media de la red resultante optimizada con KO y KU para los 21 y 42 puntos. Tanto al duplicar como al triplicar la red, la menor varianza media fue obtenida con KU, este valor fue 4% menor al obtenido con KO al densificar los primeros 21 puntos y 18% menor al densificar con los 42 puntos. La red resultante redujo significativamente la varianza de la red actual en un 55% y 64% con KO y KU, respectivamente.

**TABLA V**  
VARIANZA MEDIA OBTENIDA AL DENSIFICAR LA RED CON KO Y KU.

RED	VMKO	VMKU
Duplicada	7289.3	7054.9
Triplicada	6655.1	5421.8

**IV. CONCLUSIONES**

En regiones donde no se cuenta con información completa de la estructura espacial de la variabilidad de la precipitación, el uso de información auxiliar derivada de imágenes satelitales resulta una opción viable y confiable para el diseño y optimización de redes de monitoreo de precipitación. Con el propósito de identificar nuevos sitios de monitoreo para la precipitación en una cuenca Andina del sur del Ecuador, imágenes satelitales de variables atmosféricas y topográficas fueron empleadas para la densificación de la red mediante kriging universal.

El análisis de regresión simple y multivariado entre la imagen de precipitación y las distintas variables auxiliares mostraron mayores correlaciones entre la precipitación y la longitud, la FN y la elevación. Estos resultados concuerdan con Buytaert et al. (2006) y Campozano et al. (2016) quienes han reportado una influencia de las variables geográficas, la elevación

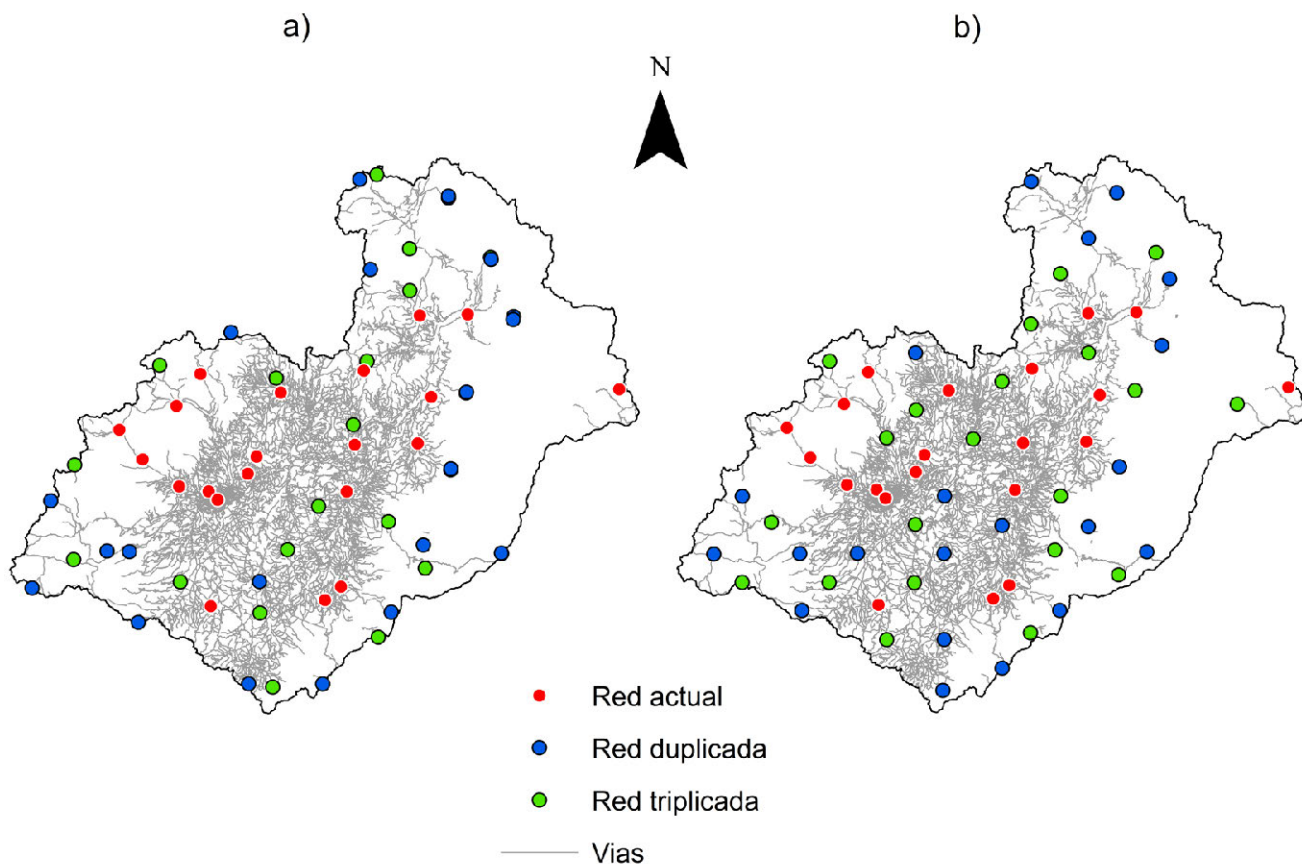


Figura 6. Ubicación de los nuevos lugares de monitoreo de precipitación. a) Red densificada con KO y b) red densificada con KU.

y de la dinámica de nubosidad en la variabilidad espacial y temporal de la precipitación en la zona de estudio. Por otra parte, la menor correlación fue encontrada con el aspecto y la TSN. A pesar de que se esperaba una buena correlación con la precipitación y TSN, esta no fue encontrada para la zona de estudio debido a las características orográficas y convectivas de la precipitación en la cuenca del Paute (Ward et al., 2011). El análisis multivariado indicó una interacción entre la elevación y VAA, la pendiente y la FN, y el VAA y la FN.

Mediante el análisis de variograma los tres modelos fueron evaluados con el fin de seleccionar el mejor modelo para la optimización de la red de precipitación. De esta manera, la red de diseño fue optimizada con el VAA la FN y la longitud como variables auxiliares mediante KU.

Los puntos resultantes de la optimización se ubicaron por todo el territorio cerca de las vías de acceso y estos presentaron una menor varianza en comparación con KO. Esta mejora en el muestreo mediante KU se debe a que este método optimiza el muestreo en dos componentes, tanto en el espacio geográfico como el de atributos. Para minimizar el primer componente, los puntos de muestreo deben cubrir lo más posible el espacio geográfico; esto explica la distribución uniforme de los puntos de muestreo que se observan en la Figura 6. Para minimizar el segundo componente, los puntos de muestreo deben cubrir lo máximo posible el espacio de atributos, de manera que las estimaciones de los coeficientes de regresión lineal sean más exactos (Brus & Heuvelink, 2007). Para mostrar de forma más clara la optimización de este úl-

timo componente, gráficos de la distribución de probabilidad de los puntos muestreados como el de toda la imagen satelital de precipitación se muestran en la Figura 7. Se observa en la Figura 7 que la forma de la curva de los puntos muestreados con KU se acerca más a la forma de la curva de toda la imagen satelital de la precipitación captada por TRMM. Esto corrobora la mayor representatividad de los puntos obtenidos por KU que con KO.

La red propuesta por KU puede ser usada como guía para una densificación paulatina de la red duplicándola en primera instancia hasta llegar al número óptimo de la misma (63 puntos) o puede ser usada también para la reubicación de otros puntos de monitoreo ya existentes en la zona pertenecientes a otras instituciones.

Sin embargo, es necesario analizar la relación de la precipitación con variables a escalas más pequeñas como la rugosidad del terreno, la temperatura en la superficie de la tierra, el contenido de humedad en el suelo, el albedo y el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) los cuales pueden ayudar a mejorar las estimaciones de precipitación y por ende a una mejor identificación de los sitios de muestreo (Alexakis & Tsanis, 2016; Fang et al., 2013). Además, se necesitan más investigaciones para establecer pautas para seleccionar adecuadamente predictores a partir de datos de teledetección y conjuntos de datos auxiliares que podrían ser de interés, especialmente para modelar conjuntos de datos correspondientes a diferentes escalas de tiempo (Bajat et al., 2013).

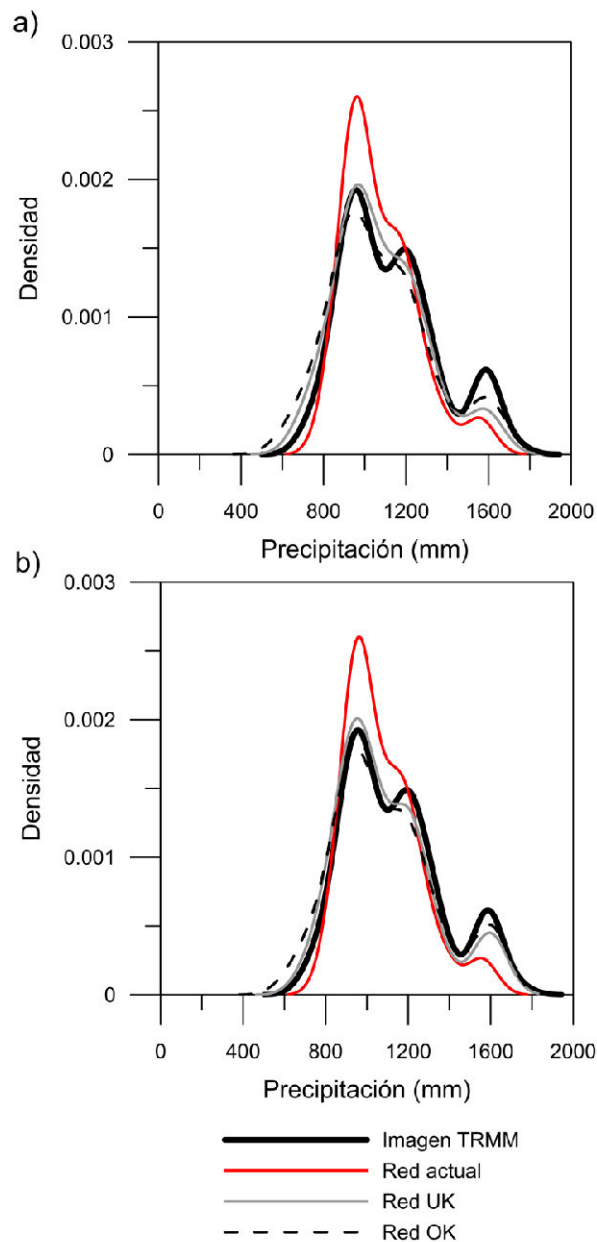


Figura 7. Comparación de la distribución de densidad de los atributos de los puntos de la red densificada y de la distribución de densidad de la imagen de precipitación TRMM. Densificación con: a) 21 puntos (red duplicada) y b) 42 puntos (red triplicada).

#### AGRADECIMIENTOS

El presente estudio ha sido financiado por la DIUC - Universidad de Cuenca a través del proyecto. "Optimización de muestreo espacial de la precipitación con geoestadística multivariada".

#### REFERENCIAS

- Adhikary Kumar, S., Gokhan Yilmaz, A., & Muttill, N. (2014). Optimal design of rain gauge network in the Middle Yarra River catchment, Australia. *Hydrological Processes*, 29(11), 2582-2599. <http://doi.org/10.1002/hyp>
- Baume, O. P., Gebhardt, a., Gebhardt, C., Heuvelink, G. B. M., & Pilz, J. (2011). Network optimization algorithms and scenarios in the context of automatic mapping. *Computers and Geosciences*, 37(3), 289-294. <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.04.014>
- Bostan, P. a., Heuvelink, G. B. M., & Akyurek, S. Z. (2012). Comparison of regression and kriging techniques for mapping the average annual precipitation of Turkey. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19(1), 115-126. <http://doi.org/10.1016/j.jag.2012.04.010>

- Brus, D. J., & Heuvelink, G. B. M. (2007). Optimization of sample patterns for universal kriging of environmental variables. *Geoderma*, 138(1-2), 86-95. <http://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.10.016>
- Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. De, & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, 329(3-4), 413-421. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031>
- Camposano, L., Célleri, R., Trachte, K., Bendix, J., & Samaniego, E. (2016). Rainfall and Cloud Dynamics in the Andes: A Southern Ecuador Case Study. *Advances in Meteorology*, 2016. <http://doi.org/10.1155/2016/3192765>
- Camposano, L., Tenelanda, D., Sanchez, E., Samaniego, E., & Feyen, J. (2016). Comparison of Statistical Downscaling Methods for Monthly Total Precipitation: Case Study for the Paute River Basin in Southern Ecuador. *Advances in Meteorology*, 2016(February). <http://doi.org/10.1155/2016/6526341>
- Celleri, R., Willems, P., Buytaert, W., & Feyen, J. (2007). Space-time rainfall variability in the Paute basin, Ecuadorian Andes. *Hydrological Processes*, 21(24), 3316-3327. <http://doi.org/10.1002/hyp.6575>
- Chebbi, A., Bargaoui, Z. K., & Cunha, C. (2011). Optimal Extension of Rain Gauge Monitoring Network for Rainfall Intensity and Erosivity Index Interpolation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 16(August), 665-676. [http://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000353](http://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000353)
- Chebbi, A., Bargaoui, Z. K., & da Conceição Cunha, M. (2013). Development of a method of robust rain gauge network optimization based on intensity-duration-frequency results. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(10), 4259-4268. <http://doi.org/10.5194/hess-17-4259-2013>
- Cheng, K. S., Lin, Y. C., & Liou, J. J. (2008). Rain-gauge network evaluation and augmentation using geostatistics. *Hydrological Processes*, 22(14), 2554-2564. <http://doi.org/10.1002/hyp.6851>
- Condom, T., Rau, P., & Espinoza, J. C. (2010). Correction of TRMM 3B43 monthly precipitation data over the mountainous areas of Peru during the period 1998-2007. *Hydrological Processes*, 25(12), 1924-1933. <http://doi.org/10.1002/hyp.7949>
- Feki, H., & Slimani, M. (2015). A comparison of three geostatistical procedures for rainfall network optimization. *IAHS-AISH Proceedings and Reports*, 366(June 2014), 166-167. <http://doi.org/10.5194/piahs-366-166-2015>
- Feki, H., Slimani, M., & Cudennec, C. (2016). Geostatistically based optimization of a rainfall monitoring network extension: case of the climatically heterogeneous Tunisia. *Hydrology Research*, 1-28. <http://doi.org/10.2166/nh.2016.256>
- Ge, Y., Wang, J. H., Heuvelink, G. B. M., Jin, R., Li, X., & Wang, J. F. (2014). Sampling design optimization of a wireless sensor network for monitoring ecohydrological processes in the Babao River basin, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 29(1), 92-110. <http://doi.org/10.1080/13658816.2014.948446>
- Goovaerts, P. (2000). Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *Journal of Hydrology*, 228(1-2), 113-129. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00144-X](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00144-X)
- Hengl, T. (2009). *A Practical Guide to Geostatistical Mapping*. Government Publications Review (Vol. 13). [http://doi.org/10.1016/0277-9390\(86\)90082-8](http://doi.org/10.1016/0277-9390(86)90082-8)
- Hengl, T., Heuvelink, G. B. M., Tadić, M. P., & Pebesma, E. J. (2012). Spatio-temporal prediction of daily temperatures using time-series of MODIS LST images. *Theoretical and Applied Climatology*, 107(1-2), 265-277. <http://doi.org/10.1007/s00704-011-0464-2>
- Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., Wolff, D. B., Adler, R. F., Gu, G., ... Stocker, E. F. (2007). The TRMM Multisatellite Precipitation Analysis (TMPA): Quasi-Global, Multiyear, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scales. *Journal of Hydrometeorology*, 8(1), 38-55. <http://doi.org/10.1175/JHM560.1>
- Mahmud, M. R., Numata, S., Matsuyama, H., Hosaka, T., & Hashim, M. (2015). Assessment of effective seasonal downscaling of TRMM precipitation data in Peninsular Malaysia. *Remote Sensing*, 7(4), 4092-4111. <http://doi.org/10.3390/rs70404092>
- Melles, S. J., Heuvelink, G. B. M., Twenhöfel, C. J. W., van Dijk, a., Hiemstra, P. H., Baume, O., & Stöhlker, U. (2011). Optimizing the spatial pattern of networks for monitoring radioactive releases. *Computers and Geosciences*, 37(3), 280-288. <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2010.04.007>
- Michaelides, S., Levizzani, V., Anagnostou, E., Bauer, P., Kasparis, T., & Lane, J. E. (2009). Precipitation : Measurement , remote sensing , climatology and modeling. *Atmospheric Research*, 94(4), 512-533. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.08.017>
- Ochoa, a., Pineda, L., Crespo, P., & Willems, P. (2014). Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific-Andean region of Ecuador and Peru. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(8), 3179-3193. <http://doi.org/10.5194/hess-18-3179-2014>
- Padrón, R. S., Wilcox, B. P., Crespo, P., & Célleri, R. (2015). Rainfall in the Andean Páramo: New Insights from High-Resolution Monitoring in Southern Ecuador. *Journal of Hydrometeorology*, 16(3), 985-996. <http://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0135.1>
- Pardo-Igúzquiza, E. (1998). Optimal selection of number and location of rainfall gauges for areal rainfall estimation using geostatistics and simulated annealing. *Journal of Hydrology*, 210(1-4), 206-220. [http://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00188-7](http://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00188-7)
- Pebesma, E. J. (2004). Multivariable geostatistics in S: The gstat package. *Computers and Geosciences*, 30(7), 683-691. <http://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.03.012>
- Shaghaghian, M. R., & Abedini, M. J. (2013). Rain gauge network design using coupled geostatistical and multivariate techniques. *Scientia Iranica*, 20(2), 259-269. <http://doi.org/10.1016/j.scient.2012.11.014>
- Tapiador, F. J., Turk, F. J., Petersen, W., Hou, A. Y., Garcia-Ortega, E., Machado, L. a T., ... de Castro, M. (2012). Global precipitation measurement: Methods, datasets and applications. *Atmospheric Research*, 104-105, 70-97. <http://doi.org/10.1016/j.atmosres.2011.10.021>
- Vuille, M., Bradley, R. S., Keimig, F., Vuille, M., Bradley, R. S., & Keimig, F. (2000). Climate Variability in the Andes of Ecuador and Its Relation to Tropical Pacific and Atlantic Sea Surface Temperature Anomalies. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2000\)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2000)013<2520:CVITAO>2.0.CO;2), (Hastenrath 1981), 2520-2535.

# Sistemas de Información Geográfica participativa para la gestión integrada de riesgos en poblaciones vulnerables de la periferia de Arequipa

Zeballos Velarde, Carlos<sup>1</sup>, Delgado Alvarado, Gustavo<sup>2</sup>, Cuzziramos Gutiérrez, Fernando<sup>3</sup>, Poco Aguilar, Sergio<sup>4</sup>

P.P. Ingeniería Ambiental/Universidad Católica Santa María  
Urb. San José s/n. Arequipa, Perú  
1 czeballosv@gmail.com  
2 gustavo.delgado.alvarado@gmail.com  
3 FCUZZIRAMOS@gmail.com  
4 sergio.arq.aqp@gmail.com

## RESUMEN

El análisis de riesgos utilizando Sistemas de Información Geográfica ha probado ser una herramienta útil para la planificación urbana y prevención de desastres ya que permite la ubicación, clasificación y cuantificación del peligro y vulnerabilidad de áreas periféricas. Sin embargo, a diferencia del trabajo de gabinete que se ha venido haciendo en nuestra localidad, el SIG participativo o PGIS permite un análisis más fino de la situación ya que analiza y sistematiza los aportes de la población de una localidad específica.

El presente artículo propone el desarrollo de un modelo integrado de gestión de riesgos participativa mediante SIG en tres niveles: técnico, participación de la población y con los tomadores de decisiones. Distintos métodos del PGIS son utilizados en cada una de las etapas de esta metodología, a fin de permitir un acceso más eficiente a la información durante las cuatro etapas del ciclo de una emergencia: respuesta, recuperación, mitigación y prevención de riesgos.

Para ello, se tomará en cuenta un área piloto en la periferia de la ciudad, donde se realizará un mapeo sistematizado de riesgos de desastre urbano, con la colaboración de la población. Posteriormente se llevará a cabo el desarrollo de una aplicación de monitoreo de riesgos en tiempo real a la escala del proyecto. Finalmente se harán recomendaciones a tener en cuenta por las instituciones dedicadas al planeamiento ambiental de la ciudad y a la respuesta ante emergencias.

Palabras clave: **SIG participativo, gestión de riesgos, Arequipa, áreas periféricas, aplicaciones de emergencia.**

## ABSTRACT

*Risk analysis using Geographic Information Systems has proven to be a useful tool for urban planning and disaster prevention since it facilitates the location, classification and quantification of hazards and vulnerability of peripheral areas. However, unlike the usual cabinet work that has been carried out in our locality, a participatory GIS or PGIS allows a finer analysis of the situation since it analyzes and systematizes the contributions of the population of a specific locality.*

*This article proposes the development of an integrated model of participatory risk management through GIS at three levels: technical, participation of the population and that of decision makers. Different methods of PGIS are used in each of the stages of this methodology, in order to allow more efficient access to information during the four stages of the emergency cycle: response, recovery, mitigation and risk prevention.*

*For this, a pilot area will be taken into account in the periphery of the city, where a systematic mapping of urban disaster risks will be carried out, with the collaboration of the population. Subsequently, the development of a real-time risk monitoring application will be carried out at the project scale. Finally recommendations will be made to be taken into account by the institutions dedicated to the city's environmental planning and emergency response.*

**Keywords:** *Participatory GIS, Disaster Risk Management, Arequipa, peripheral areas, emergency application.*

## I. INTRODUCCIÓN

### A. ANTECEDENTES

Arequipa, segunda ciudad del Perú, de población aproximada de 1 millón de habitantes, ha experimentado en las últimas décadas un crecimiento caótico y no planificado, protagonizado por migrantes o personas de condición socioeconómica baja. La ciudad se localiza en un árido desierto, surcada por el fértil valle del río Chili, flanqueada de norte a este por una cadena de altas montañas, que son el Chachani, Picchu Picchu y Misti (volcán que presenta actividad fumarólica) y por el sur por la cadena del barroso, a una altura que oscila entre los 2300 a 2800 msnm. Arequipa se extiende a lo largo de 18,000 ha con una bajísima densidad neta calculada al 2025 de 101 hab/Ha, que es particularmente más baja cuanto más se aleja de su centro formal (IMPLA, 2015).

Muchos asentamientos se han localizado en la periferia de la ciudad, particularmente sobre zonas calificadas de alto riesgo. Como consecuencia, son frecuentes las pérdidas humanas y materiales a causa de eventos de desastre, particularmente entre las poblaciones más vulnerables.

Ante este hecho, diversos organismos gubernamentales han realizado mapas de riesgo, algunos de ellos utilizando sistemas de información geográfica. Sin embargo, estos esfuerzos han sido insuficientes ya que no han logrado una respuesta eficiente en el caso de emergencias ni tampoco una planificación efectiva anterior a los desastres.

Ante esta situación, el proyecto “Sistemas de Información Geográfica Participativa para la Gestión Integrada de Riesgos en Poblaciones Vulnerables de la Periferia de Arequipa”, patrocinado por la Universidad Católica de Santa María de Arequipa (al ser uno de los ganadores del concurso de proyectos para fondos concursables 2016-II) propone una metodología integral en la que se subraya la participación de la ciudadanía como insumo fundamental para una evaluación y posterior gestión de riesgo de desastre de una forma más integral, eficiente y efectiva.

### B. CONCEPTOS BÁSICOS

A fin de clarificar las ideas que se estarán tratando en este artículo y el proyecto en general, se proponen algunos conceptos clave y su significado para la investigación en general.

#### 1) PELIGRO

Conocidos también como amenazas, los peligros pueden ser originados por fenómenos naturales o causas antrópicas. Para este estudio sólo se han considerado los peligros de origen natural.

Estos constituyen la probabilidad de que un fenómeno potencialmente dañino, de origen natural, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos. En el caso de Arequipa, los principales peligros a los que se ve expuesta la ciudad son:

- Inundación
- Deslizamiento
- Sismos
- Erupción volcánica (no registrada en la historia, pero de posibilidad latente)

#### 2) VULNERABILIDAD

Es la susceptibilidad de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas, de sufrir daños por acción de un peligro o amenaza.

El crecimiento poblacional y los procesos de urbanización, las tendencias en la ocupación del territorio, el proceso de empobrecimiento de importantes segmentos de la población, la utilización de sistemas organizacionales inadecuados y la presión sobre los recursos naturales, han hecho aumentar en forma continua la vulnerabilidad de la población frente a una amplia diversidad de fenómenos de origen natural.

#### 3) RIESGO

Es el resultado de relacionar el peligro con la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos y consecuencias sociales, económicas y ambientales asociadas a uno o varios fenómenos peligrosos. Cambios en uno o más de estos parámetros modifican el riesgo en sí mismo, es decir, el total de pérdidas esperadas y las consecuencias en un área determinada. (Carreño et. al. 2005).

#### 4) PARTICIPACIÓN

Hacer frente a los riesgos de desastres, no es cuestión sólo de “especialistas”, se trata más bien de impulsar la participación ciudadana; es decir, el reconocimiento social de las personas, sobre todo, las más vulnerables, a fin de aumentar sus capacidades de controlar los riesgos.

La participación ciudadana hace posible la movilización de la voluntad y recursos de los actores sociales alrededor de la reivindicación de sus derechos, mediante el aumento de sus capacidades personales y colectivas para alcanzar mayores niveles de calidad de vida. Así, la participación es ante todo un derecho que consiste en intervenir activamente en las decisiones y acciones relacionadas con la planificación, la actuación y la evaluación de las actividades.



### C. ESTADO DEL ARTE

#### 1) *Uso experimental de modelos tridimensionales participativos en la gestión comunitaria de riesgos.*

Maceda et Al. (2009) Desarrollaron el proyecto de gestión comunitaria de riesgos en la isla de Divinubo, en el archipiélago filipino, haciendo uso de la metodología desarrollada por Rambaldi y Callosa-Tarr (2002), que prevé el uso de modelos tridimensionales a escala, armados por la misma comunidad, para la identificación de riesgos percibidos y la definición de acciones en conjunto que permitan mitigar dichos riesgos. Paralelamente a la construcción del modelo, se desarrollaron talleres y focus-group con miembros de la comunidad, de tal forma que se pudieran listar y perfilar los distintos riesgos, identificar la infraestructura amenazada y las vulnerabilidades y capacidades de la comunidad, usando para esto la metodología de Anderson y Woodrow (1989) refinada por Abarquez y Murshed (2004).

Entre los beneficios del estudio de Maceda et Al. (2009), podemos encontrar que es un método barato, replicable, participativo, inclusivo y rico en información, así mismo hace que la gente tome conciencia más rápidamente del entorno físico en el que habitan y su información es fácilmente integrable en SIG. Sin embargo, entre sus deficiencias tenemos que es un caso de estudio aplicado a una pequeña comunidad aislada de 700 habitantes, su aplicación eficiente en comunidades poblacionales o territoriales mayores esta aun por probarse, así mismo, la información que aporta tiende a concentrarse en las capacidades y vulnerabilidades físicas, dejando un flanco ciego hacia el aspecto social. Finalmente, el aspecto organizativo es también de vital importancia, pues es un método que funciona mejor con la permanente actualización de datos.

#### 2) *Mapeo participativo de riesgos para la definición de objetivos de investigación y asistencia*

Smith et Al (2000) recolectaron datos durante 6 meses, en 1998, en el área de frontera de Etiopia y Kenia, de 120 grupos entrevistados, a través de entrevistas y expresión gráfica de la localización de vulnerabilidades. Así pudieron reconocer las mayores vulnerabilidades de la comunidad, entre ellas la inseguridad de acceso a agua y alimento, así como el acceso a puestos de salud. La localización de las vulnerabilidades fue georreferenciada y subida en una webapp a la página del proyecto.

Smith et Al (2000) reconocieron una serie de fortalezas y debilidades de la aplicación de la metodología participativa en su proyecto. El mapeo participativo del riesgo se caracteriza por ser una herramienta de colección de datos rápida y de bajo costo, además de dejar a los participantes a hablar por sí mismos, obteniendo información de primera mano. Además de ser la información de fácil representación gráfica en gabinete. Finalmente, el mapeo participativo de riesgo contiene la percepción subjetiva de los participantes, y debe por lo tanto representar gráficamente estas diferencias perceptuales, por ejemplo, en el caso de estudio, las gentes de menores ingresos económicos perciben una mayor vulnerabilidad al riesgo que aquellos con recursos, dicha diferenciación es importante para obtener resultados más completos en el estudio.

Sin embargo, también hay que tener en cuenta ciertos riesgos, por ejemplo, el peligro de excluir a ciertos grupos durante la recolección de datos, usualmente los grupos más vulnerables. Así mismo se reconoce la necesidad de incluir la temporalidad en estudios de este tipo, pues repartir el estudio con cierta regularidad de modo que se puedan examinar los cambios en las medidas de incidencia y gravedad, puede incluso ser una

herramienta complementaria útil en los sistemas de alerta temprana, combinado con SIG, este método daría no solo resultados espaciales sino también temporales.

#### 3) *Talleres de participativos y mapas parlantes ante ciclos de riesgo en Lima*

En el contexto nacional, un antecedente importante es el proyecto cLIMA sin riesgo, desarrollado en Lima a partir del 2015, donde destaca el uso de talleres participativos en sectores antagónicos de la ciudad, Barrio Altos (BA) “centro” y el José Carlos Mariátegui (JCM) “periferia”

En ambos ámbitos, se encuentran “ciclos a través de los cuales amenazas ambientales, episódicas, repetitivas y desastres de escala menor generalmente no registrados, se acumulan en las localidades”

El proyecto examina aspectos que por qué se desarrollan trampas de riesgo urbano así como el impacto que tienen en la cotidianidad de los vecinos a su vez que la forma amenazan las inversiones hechas por la ciudadanía y agencias públicas con el fin de mitigar y enfrentar riesgos. Entre los resultados del proyecto destaca la elaboración de “mapas parlantes” que son bases cartográficas donde se mapean los principales riesgos evaluados (CIDAP, 2015).

La metodología destaca por su nivel comparativo entre BA y JCM, pero adolece de especificidad en el análisis ya que usa fuentes cartográficas convencionales y los resultados solo muestran lineamientos generales para interrumpir los ciclos de riesgo. (Allen et Al, 2016)

### D. ALCANCES Y LIMITACIONES

El proyecto “Sistemas de Información Geográfica Participativa para la Gestión Integrada de Riesgos en Poblaciones Vulnerables de la Periferia de Arequipa”, cuenta con una pequeña subvención de la Universidad Católica de Santa María de Arequipa, la cual no es suficiente para analizar todo el problema de la periferia de la ciudad. Por este motivo se ha optado por trabajar con el distrito de Jacobo Hunter como área piloto, ya que es un distrito representativo de los peligros de otras áreas de la ciudad y este estudio puede ser replicable a realidades similares en la región o país.

Este proyecto, de un año de duración, ha comenzado en enero del 2017, por lo que al momento de escribir este ensayo se ha realizado la recolección de datos y los talleres participativos con la población, así mismo se viene preparando la interpretación de la información. Por lo tanto este paper se centrará en el enfoque metodológico de la propuesta, y en la presentación de los resultados esperados.

## II. MÉTODO

El Método propuesto para el proyecto se divide en 3 fases en que las acciones propuestas puedan ser un aporte en la Gestión de Riesgo de Desastres: Prospectiva, Reactiva y Correctiva. (Figura 1)

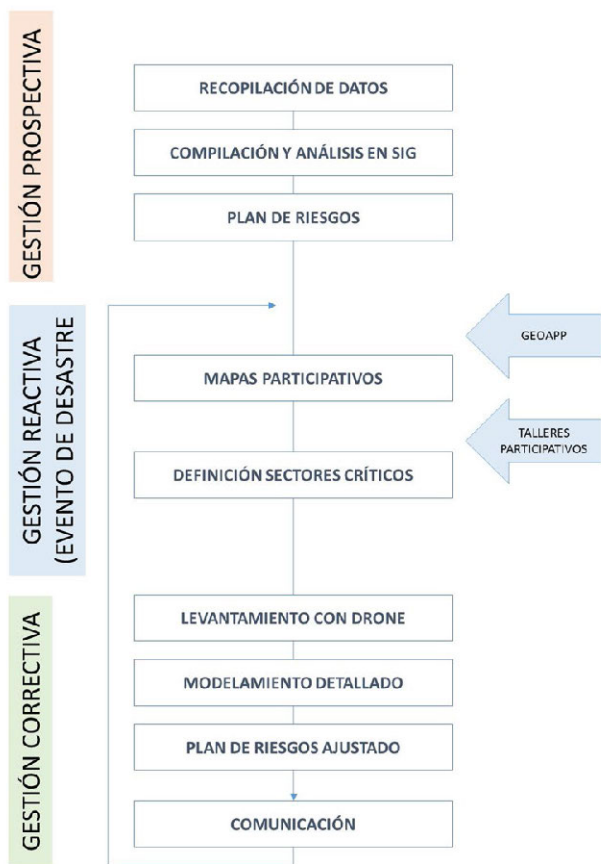


Figura 1. Metodología.

Asimismo, se han considerado tres tipos de actores principales:

- Los técnicos, que tienen a su cargo la recopilación de datos, análisis y producción de mapas temáticos en SIG.
- La población organizada: que participa y da su opinión sobre su experiencia con riesgos específicos.
- Los políticos y/o tomadores de decisiones: quienes usan los insumos de la información generada en SIG para gestionar los recursos en las áreas más afectadas.

Estos tres tipos de actores tienen diferente tipo de involucramiento en las cuatro etapas de una emergencia, según ONU MUJERES:

- La prevención o la precrisis, que pertenece a la gestión prospectiva, y es la etapa antes de que se desencadene el desastre.
- La respuesta o crisis, que es cuando se desencadena el desastre y/o este alcanza su punto culminante, originando las primeras acciones inmediatas, correspondiente a la gestión reactiva.
- La estabilización, que corresponde también a la gestión reactiva y que ocurre cuando se han atendido las necesidades inmediatas de emergencia
- La recuperación, que corresponde a la gestión correctiva, cuando se revisan los planes de contingencia, la cual a su vez vuelve al ciclo de la prevención. (Tabla 1).

TABLA 1.

NIVELES DE INVOLUCRAMIENTO DE LOS ACTORES SEGÚN ACTIVIDAD Y NIVELES DE EMERGENCIA

ACTIVIDAD	ACTORES INVOLUCRADOS	NIVEL DE EMERGENCIA
Recopilación de datos	Técnicos	Prevención
Análisis de riesgos en gabinete	Técnicos	Prevención
Elaboración de Plan de Riesgos	Técnicos	Prevención
Desarrollo de Geoapp	Técnicos	Prevención
Taller participativo	Población	Respuesta
Definición de Sectores Críticos	Técnicos	Respuesta
Aplicación de Geoapp	Población	Respuesta
Levantamiento con drone	Técnicos	Recuperación
Análisis y propuesta a detalle	Técnicos	Recuperación
Integración de resultados	Población	Prevención
Toma de decisiones	Políticos	Prevención, Recuperación
Difusión	Políticos, Población	Prevención, Recuperación

### III. RESULTADOS

Los resultados van en relación con cada una de las fases presentadas en la Metodología. La recopilación de datos y el análisis SIG han permitido enmarcar los aspectos a ser abordados en las tres fases del proyecto, el desarrollo del modelo y la GeoAPP permitirá ser el aporte como instrumentos que permitirán mejorar la toma de decisiones en la gestión de riesgo de desastres. En resumen los resultados por cada fase, se describen a continuación:

#### A. GESTIÓN PROSPECTIVA

##### 1) Recopilación de datos

Consiste en la recopilación de información de diversas fuentes para su posterior desarrollo en SIG.

Las fuentes consultadas han sido el CENEPRED para peligro volcánico, el ANA para peligro de inundación, el estudio de INDECI y la UNSA para peligro sísmico y el Modelo de Elevación de Terreno DEM de la NASA/USGS para definir la pendiente.

##### 2) Compilación y análisis en SIG

Posteriormente se ha realizado el estudio en gabinete y modelamiento en SIG tanto a nivel metropolitano por el IMPLA como a nivel distrital por la Municipalidad de Hunter con el apoyo de especialistas.

Complementariamente se desarrolló levantamiento de campo a nivel de lote en áreas específicas para la elaboración del Plan Urbano Distrital

##### 3) Desarrollo del Plan de Riesgos Distrital

Aquí se definen las acciones a tomar en cuenta para el desarrollo de políticas de gestión de riesgos. Este plan se hizo bajo la normativa impulsada por el Ministerio de Economía y Finanzas en su programa de incentivos a la mejora de la gestión municipal del año 2017 mediante la Meta 27, "Actualización de la Información para la Gestión de Riesgo de Desastre"

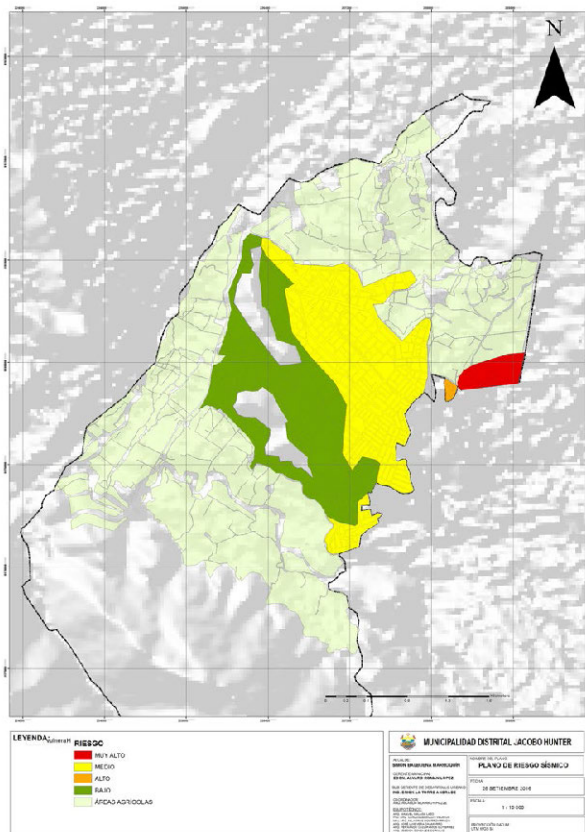


Figura 2. Riesgo Sísmico. Elaboración: Equipo PDU, Hunter

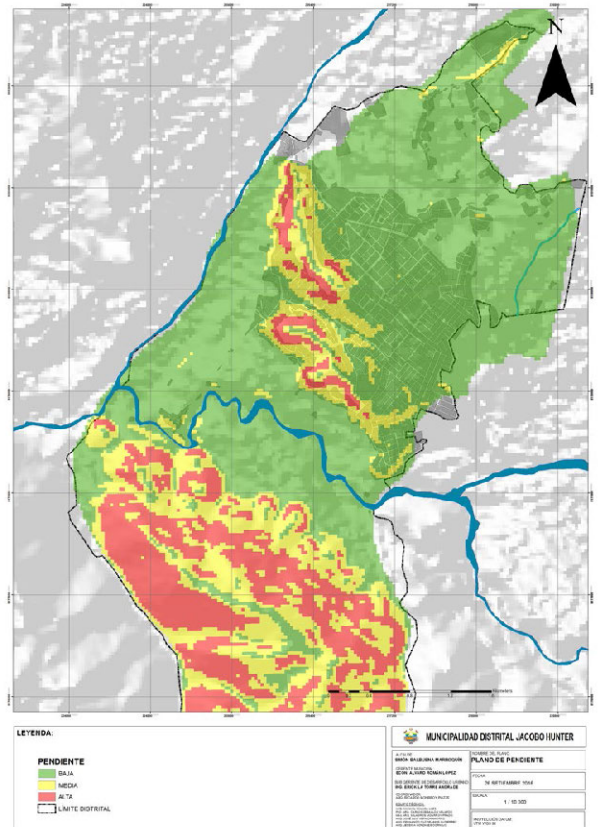


Figura 4. Peligro por pendiente. Elaboración: Equipo PDU, Hunter

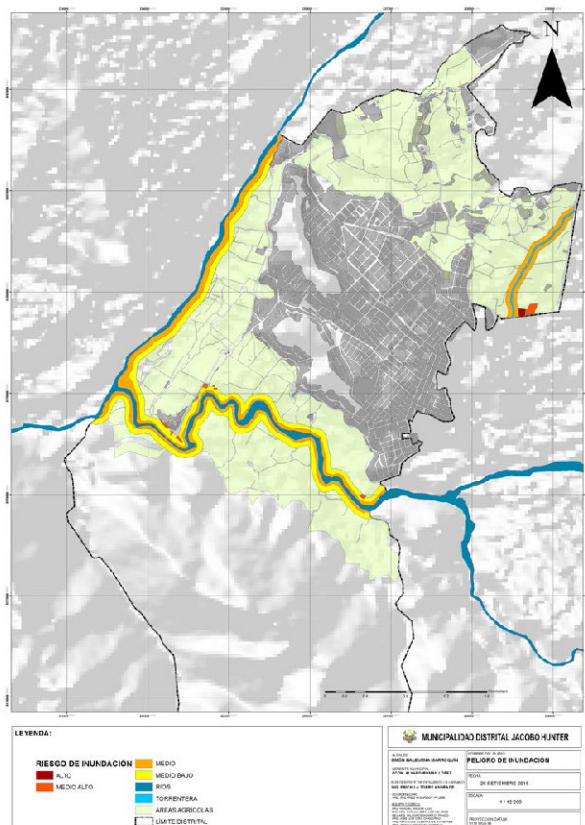


Figura 3. Peligro de Inundación. Elaboración: Equipo PDU, Hunter

## B. GESTIÓN REACTIVA

### 1) Desarrollo de la GEOAPP

Consiste en el desarrollo de un aplicativo móvil que permita a la población identificar el lugar y el tipo de riesgo y posteriormente recibir, clasificar y difundir esta información a las autoridades municipales y de Defensa Civil en el caso de un evento de desastre.

Al momento de escribir el artículo se viene desarrollando la geoapp en ambiente de ArcGIS online y se planean hacer las primeras pruebas con la población en julio de este año. La aplicación deberá estar operativa y la población deberá estar capacitada en su uso antes de fines de año, cuando comienza la estación de lluvias en Arequipa.

### 2) Talleres participativos

Posterior a eventos de fuertes lluvias ocasionadas por el fenómeno del Niño 2017, es que se ha desarrollado un taller participativo con la población del distrito de Jacobo Hunter en el Salón de Usos Múltiples de la Municipalidad, el día 25 de marzo. En coordinación con la municipalidad se hizo una convocatoria masiva a los dirigentes de diversas organizaciones populares. Se invitó a la población a que localicen sobre mapas impresos de los diferentes sectores del distrito, los diversos incidentes que ocurrieron en esas zonas, su tipo y magnitud.

Finalmente se tuvo un conversatorio donde se intercambiaron ideas para la mejora de la gestión de riesgos.



Figuras 5. Taller participativo, llevado a cabo en la Municipalidad de Hunter el viernes 17 de marzo de 2017 con la participación activa de la población

### 3) Desarrollo de Mapas participativos

Posteriormente al taller, se realizó un trabajo de gabinete donde se plasmó en ArcMap los eventos identificados por la población.

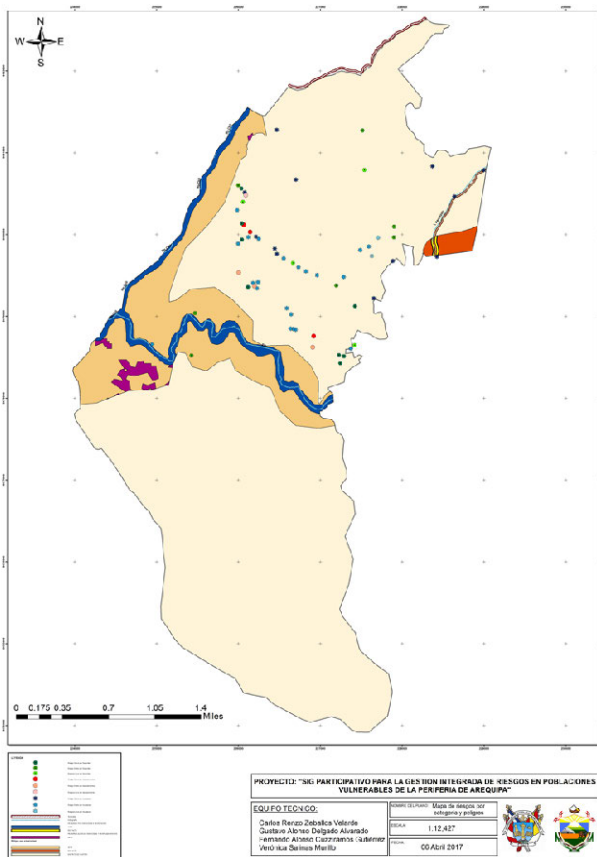


Figura 6. Mapa de peligros participativo. Elaboración propia

### 4) Definición de sectores críticos

El desarrollo de mapas participativos permitió clarificar los sectores críticos del distrito, a la vez que corroborar y afinar los análisis realizados en el plan de riesgos, delimitando con más exactitud.

## C. GESTIÓN CORRECTIVA

### 1) Levantamiento con drone

Una vez identificado el sector crítico en la zona de Huasache, se ha realizado un levantamiento con drone de ala fija, en un área de 2 ha. Este levantamiento ha permitido obtener un modelo tridimensional de la topografía y los elementos del paisaje (viviendas, canales, vegetación, etc.), la pendiente del terreno, los materiales de construcción de las viviendas vulnerables así como los riesgos analizados en SIG.

En el levantamiento con drone obteniendo diferentes tipos de datos:

- a. Modelado en 3D, el cual se usa en programas como 3DStudio



Figura 7. Modelado en 3D del sector crítico obtenido por drone

- b. Nubes de puntos: son un conjunto de datos tridimensionales que representan la superficie externa de los objetos.



Figura 8. Nube de puntos del sector crítico

- c. Curvas de nivel: para representar la topografía en detalle de la zona de estudio.

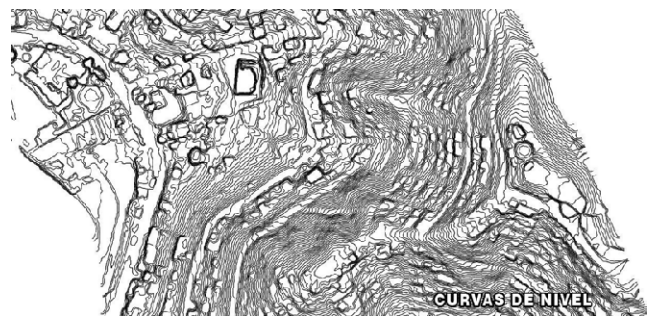


Figura 9. Curvas de nivel del sector crítico

- d. Ortomosaico en alta definición: aerofotografía georeferenciada a resolución de 5 cm por pixel, se pueden ver numerosos detalles en alta calidad.



Figura 10. Ortomosaico. Detalle del sector crítico

- e. Modelo Digital de superficie (DMS): son una representación de la superficie en la cual se pueden modelar eventos de riesgo, como flujo hidráulico, utilizando software como Global Mapper.

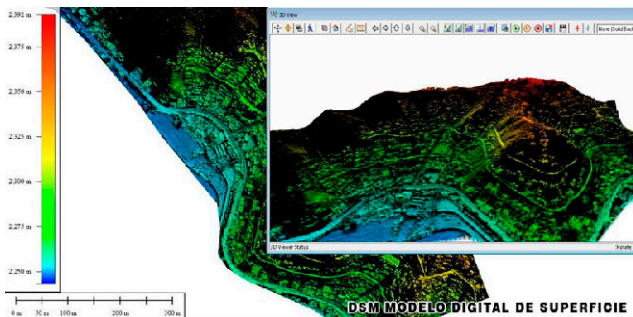


Figura 11. Modelo digital de superficie.

## 2) Modelamiento en detalle

Con SIG se hará un modelamiento detallado de escenarios de riesgo, como posibles eventos de deslizamiento, flujos hidrológicos, áreas de embalse, etc. evidenciando áreas expuestas, a fin de proponer acciones correctivas y de mitigación.

## 3) Evaluación de Riesgos

La identificación de las zonas expuestas a través del modelamiento, permitirá afinar los planes y proyectos estipulados en los planes metropolitano y distrital para una adecuada gestión de riesgo y facilitar la toma de decisiones de las autoridades competentes.

## 4) Comunicación

Los resultados obtenidos serán integrados a la página del SIGRID del CENEPRED y a su vez comunicados periódicamente al gobierno local y a población mediante un componente especial en la página web de la municipalidad.

## IV. CONCLUSIONES

La propuesta se centra en el involucramiento de la población y los tomadores de decisiones a través de la participación de estos actores en la producción de datos y su incorporación a un sistema integrado de información geográfica participativa.

El artículo presenta una metodología que busca integrar los tres momentos de la gestión de riesgos: prospectiva, reactiva y correctiva, a través de un modelo dinámico y que se retroalimenta afinando la información para gestión de riesgos.

Por motivos presupuestales se ha tomado en cuenta un distrito piloto, y dentro de él se han identificado sectores críticos para su modelamiento a detalle. Sin embargo se espera que este modelo pueda ser replicado a otras partes del distrito, ciudad o región

Se han definido con claridad los componentes necesarios para tener un desarrollo integral del modelo. Se espera que el proyecto logre desarrollar un prototipo funcional de gestión de riesgos participativa para áreas periféricas de la ciudad de Arequipa, así como la medición de su efectividad.

## AGRADECIMIENTOS

Agradecemos muy especialmente a la Bach. Ing. Verónica Salinas Murillo, miembro del equipo, que por razones personales no participó en la elaboración de este paper, pero cuya ayuda en el desarrollo de los mapas participativos ha sido muy importante.

Se agradece el apoyo del Vicerrectorado de Investigación de la UCSM, en la persona del Dr. Gonzalo Dávila del Carpio por su apoyo pleno a la elaboración de este y otros proyectos relacionados a la gestión de riesgos.

Se agradece la colaboración del Arq. Edwin Ríos Pacheco en la recopilación de datos y vuelo con drone.

Se agradece al Municipio Distrital de Hunter, en la persona de su alcalde, el Sr. Simón Balbuena, y de la Arq. Helen Choque Bruna, jefe de la oficina de Defensa Civil del Distrito.

Agradecemos el apoyo de las señoritas estudiantes: Oshin Chua, Nathalie Ramos y Rocío Olmedo por su apoyo durante la realización del taller participativo

Queremos agradecer muy especialmente la participación de estudiantes de pregrado de la facultad de arquitectura de la Universidad Nacional de San Agustín, curso de Centros de Investigación y el Programa Profesional de Arquitectura de la Universidad Católica Santa María, curso de Teoría del Urbanismo II. La lista completa de alumnos participantes en estudios y propuestas se encuentra en el blog Mi Moleskine arquitectónico, en la siguiente entrada <http://moleskinearquitectonico.blogspot.pe/2017/05/costuras-urbanas.html>.

## REFERENCIAS

- Abarquez, I. and Murshed, Z. (2004) Community-based disaster risk management: Field practitioners' handbook, Pathumthani: Asian Disaster Preparedness Center
- Allen, A., Wesely, J., & Zilbert, L. (2016). Capacidades e inversión en la gestión de asentamientos y el riesgo urbano. A Boletín N° 3, Octubre 2016. Clima sin riesgo <http://www.climasinriesgo.net/>
- Anderson, M and Woodrow, P (1989) *Rising from the Ashes: Development Strategies in Times of Disasters*, Boulder: Westview Press
- Carreño Tibaduiza, M. L., Cardona Arboleda, O. D., & Barbat Barbat, H. A. (2005). Sistema de indicadores para la evaluación de riesgos. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).
- CENEPRED (2015). Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales . NEVA STUDIO SAC. Lima 2015 <http://dimse.cenepred.gob.pe/simse/cenepred/docs/MAN-manual-evaluacion-riesgos-natural-v2.pdf>
- CIDAP, Centro de Investigación, Documentación y Asesoría Poblacional. (2015)
- Fernández, M. A. (1996). Ciudades en riesgo: degradación ambiental, riesgos urbanos y desastres en América Latina. Soluciones Practicas.Red de estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. FLACSO Lima 1996
- INDECI, & UNSA. (2001). Tomo v: Mapa de peligros y lineamientos para el plan de usos del suelo de la ciudad de Arequipa. Plan de mitigación de los efectos producidos por los fenómenos naturales ciudad de arequipa primera fase. Programa de ciudades sostenibles primera etapa. (2001). Arequipa:
- INGEMET. (2007). Mapa de peligros múltiples de la zona proximal del volcán misti. Arequipa:
- Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2016). Arequipa alberga a 1 millón 301 mil habitantes a los 476 años de su creación política. Retrieved from <https://www.inei.gov.pe/prensa/noticias/arequipa-alberga-a-1-millon-301-mil-habitantes-a-los-476-anos-de-su-creacion-politica-9246/>
- Lavell, A (1997). Viviendo en Riesgo, comunidades vulnerables y prevención de desastres en América Latina. Red de Prevención de desastres en América Latina. FLACSO Lima 1997, [http://desenredando.org/public/libros/1994/ver/ver\\_todo\\_nov-20-2002.pdf](http://desenredando.org/public/libros/1994/ver/ver_todo_nov-20-2002.pdf)
- Maceda, E. A., Gaillard, J. C., Stasiak, E., Le Masson, V., & Le Berre, I. (2009). Experimental use of participatory 3-dimensional models in island community-based disaster risk management. *Shima*, 3(1).
- Maskrey, A. C. (1989). El manejo popular de los desastres naturales: estudios de vulnerabilidad y mitigación. In *El manejo popular de los desastres naturales: Estudios de vulnerabilidad y mitigación*. Tecnología Intermedia (ITDG).
- Maskrey, A. C. (1993). Vulnerabilidad y mitigación de desastres. In *Los desastres no son naturales* (pp. 111-34). Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina.
- Municipalidad Distrital de Hunter/ Monrroy, R., Málaga, M., Monrroy, M., Zeballos, C., Cuzziramos, F, Vera, J, Gonzales, J. Plan Urbano Distrital Jacobo Hunter 2016-2025 Propuesta . 2016. [http://www.munihunter.gob.pe/WP/documentos/plan\\_urbano2016-2025/PROPUESTA%20PUD%202016-2025.pdf](http://www.munihunter.gob.pe/WP/documentos/plan_urbano2016-2025/PROPUESTA%20PUD%202016-2025.pdf)
- ONU MUJERES. Fases de emergencia. <http://www.endvawnow.org/es/articles/1510-fases-de-la-emergencia.html>
- Rambaldi, G and Callosa-Tarr, J (2000) *Manual on Participatory 3-Dimensional Modeling for Natural Resource Management*, Quezon City: Department of Environment & Natural Resources
- Sanchez Aguilar, A. (2015). In OIM (Ed.), *Migraciones internas en el Peru*. Lima:
- Smith, K., Barrett, C. B., & Box, P. W. (2000). Participatory risk mapping for targeting research and assistance: with an example from East African pastoralists. *World Development*, 28(11), 1945-1959.

# Zonificación de contaminación por metales pesados en San Bartolomé

Valencia Fernando<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería en Minas/  
Facultad de Ciencia y Tecnología/  
Universidad del Azuay  
Av. 24 de Mayo y Hernán Malo/  
Azuay/Ecuador  
fvalencia@uazuay.edu.ec

## RESUMEN

La investigación trata de la determinación espacial de concentraciones de metales pesados presentes en suelos de uso agrícola mediante la aplicación de un modelo geoestadístico generado a partir del análisis de la dispersión secundaria del yacimiento polimetálico de San Bartolomé y de las piscinas de relave que desde el año 1994 se encuentran abandonadas significando las mismas un pasivo ambiental. El área de estudio cubre 2400 hectáreas correspondientes a las microcuencas de las quebradas Sorche y El Salado de la parroquia San Bartolomé, cantón Sígsig provincia del Azuay. Para la elaboración del modelo de contaminación por metales pesados se procedió a la toma de muestras de suelo de forma estratificada en áreas con pendientes menores a 20° y de vocación agrícola con una densidad al menos de 2.5 muestras por kilómetro cuadrado; en total se recolectaron 106 muestras. El análisis en laboratorio determinó en parte por millón (ppm) la concentración de metales pesados: plomo (Pb), cadmio (Cd) y zinc (Zn) mediante espectrometría de absorción atómica. Se procedió al análisis y tratamiento de la información que incluye la generación del modelo predictivo de dispersión de metales pesados en la zona de interés mediante la utilización de un software SIG. Este modelo permitió establecer las áreas sobre las cuales la concentración de metales pesados objeto de la investigación supera los umbrales de riesgo de acuerdo a la normativa ambiental ecuatoriana y cartografiar los resultados que pueden ser utilizados como insumos de ordenamiento territorial. Se proponen alternativas tendientes al manejo del pasivo ambiental.

Palabras clave: **geoestadística, geoquímica, metales pesados, contaminación, relaveras.**

## ABSTRACT

*The research deals with the spatial determination of concentrations of heavy metals present in soils of agricultural use through the application of a geostatistical model generated from the analysis of the secondary dispersion of the polymetallic deposit of San Bartolome and the tailings deposit that from the year 1994 are abandoned, meaning that they are an environmental liability. The study area covers 2400 hectares corresponding to the microbasins of the Sorche and El Salado streams of the San Bartolome parish, Sig-sig province of the Azuay. For the elaboration of the model the soil samples were taken stratified in areas with slopes less than 20° and agricultural vocation with a density of at*

least 2.5 samples per square kilometer; in total, 106 samples were collected. The laboratory analysis determined the concentration of heavy metals (Pb, Zn, Cd) by atomic absorption spectrometry, the method used in the laboratory allows to determine concentration in ppm. We proceeded to the analysis and treatment of the information that includes the generation of the predictive model of dispersion of heavy metals in the zone of interest through the use of GIS software. This model allowed to establish the areas on which the concentration of heavy metals subject to the investigation exceeds the thresholds of risk according to the Ecuadorian environmental regulations and to map the results that can be used as input of parochial territorial ordering. Alternatives to the management of identified environmental liabilities are proposed.

**Keywords:** *geostatistical, geochemistry, heavy metals, tailings deposits.*

## I. INTRODUCCIÓN

La minería es una de las actividades antrópicas más impactantes al Ambiente y ha sido declarada como sector estratégico por el gobierno ecuatoriano, los denominados proyectos estratégicos y su próximo arranque han generado una significativa conflictividad social respecto al tema de la minería a gran escala en nuestro país, de las pocas experiencias se han conseguido siempre resultados negativos referidos al impacto ambiental como el caso de Nambija, Ponce Enríquez, San Gerardo, San Bartolomé en la provincia del Azuay entre otros.

Considerando la movilidad geoquímica de metales pesados y su importancia al ser contaminantes de agua y suelo, es importante conocer la dinámica de los mismos hacia los estratos indicados. Investigaciones recientes utilizan la geoquímica y la geoestadística para la modelación de la contaminación por metales pesados sobre suelo y agua sobre zonas rurales y urbanas (Islam, Ahmed, Raknuzzaman, Habibullah -Al- Mamun, & Islam, 2015), especial interés demarcan las investigaciones sobre zonas de relaveras abandonadas (Khalil et al., 2013), los principales metales pesados de interés por su incidencia en la salud humana son el Pb, Cd, Zn, y el Hg, los dos primeros tienen especial interés en el estudio de la bio-absorción de los vegetales y la incidencia en la cadena trófica incluyendo la humana (Rehman, Khan, Brusseau, & Shah, 2017).

Los estudios realizados procuran también la definición de la incidencia del background natural de concentraciones de metales pesados y la acción antrópica como generadora de anomalías geoquímicas, vale destacar que algunas actividades antrópicas diversas a la minería se identifican también como importante fuente de generación de contaminación por metales pesados (Wu et al., 2015).

La naturaleza de los suelos andinos resultan de especial interés en cuanto a la respuesta sobre la contaminación de metales pesados, experiencias de investigación sobre zonas de altura (Yang et al., 2014) muestran comportamientos particulares sobre depósitos y relaveras de yacimientos de Cu.

Las herramientas de análisis de datos, considerando la movilidad geoquímica de metales pesados como valores que se comportan como variables regionalizadas, son los interpoladores geoestadísticos de mucha utilidad en minería para procesos de evaluación de reservas y ahora aplicados también en la generación de modelos de dispersión geoquímica (Tapoglou, Karatzas, Trichakis, & Varouchakis, 2014).

## II. MÉTODO

Para realizar la zonificación de contaminación por metales pesados se ha procedido con la recolección de 106 muestras de suelo ubicadas sobre áreas de vocación agrícola y homo-

géneamente distribuidas sobre el área de estudio, las mismas han sido sometidas a análisis de laboratorio para determinar la concentración de metales pesados en las mismas (Pb, Zn, Cd), y con el apoyo de software SIG proceder a la generación de modelos de dispersión geoquímica.

Área de estudio.- corresponde a las microcuencas hidrográficas de las quebradas Sorche y El Salado, han sido elegidas por representar unidades naturales de respuesta ante dinámica de disolución y transporte (movilidad de minerales) y estar el depósito mineral y relavera sobre la parte alta cerca de las dos microcuencas. La zona cubre 2440 hectáreas y se ubica a 20.5 km en línea recta al sureste de la ciudad de Cuenca, ver Figura 1, mayoritariamente ubicadas sobre la parroquia San Bartolomé del cantón Sígsig provincia del Azuay. Su acceso se lo puede realizar por las vías de primer orden: Cuenca, El Valle, Santa Ana, San Bartolomé o Cuenca, El Descanso, Gualaico, Chordeleg, La Unión, San Bartolomé. Ver Figura 1. El punto más alto se encuentra a los 3320 y el más bajo a los 2300 msnm su relieve es accidentado por la incidencia erosiva de los drenajes marcando significativamente las márgenes de las quebradas aunque las pendientes indican que existe más del 85% de superficie por debajo de los 30° de inclinación, terrazas muy atractivas desde el punto de vista agrícola productivo se pueden observar en toda el área de estudio.

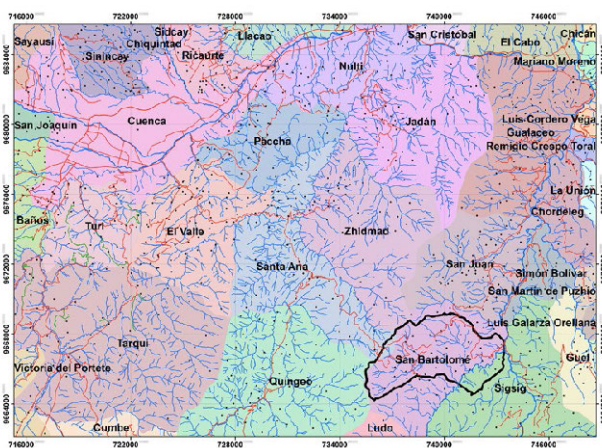


Figura 1.- Ubicación regional de la zona de estudio, en colores la división parroquial.

**Geología.-** Geológicamente se ubica a la formación Tarqui como la dominante en la zona de estudio, estos materiales son volcánicos eólicos en su mayoría fuertemente degradados, es considerada como el manto volcánico que cubre extensas regiones en la sierra sur del Ecuador en discordancia sobre capas más antiguas. En la secuencia hay depósitos de piroclastos y aglomerados de composición riolítica a andesiti-



ca; tobas, cenizas volcánicas e ignimbritas y localmente lavas. (PRECUA, 1998)

En las inmediaciones del centro parroquial de San Bartolomé se identifica la presencia de la Unidad Maguazo, consiste principalmente de filitas, micaesquistos, pizarras y cuarcitas intensamente plegadas. Estas rocas fueron producidas por el metamorfismo de rocas volcánicas y volcanodetritos (andesitas, tobas, conglomerados y aglomerados volcánicos), rocas que están expuestas también en el valle del río Paute, aguas abajo de La Josefina. Este metamorfismo ocurrió hace 86 a 90 millones de años (Ma), Cretácico Superior-Senoniano. (PRECUA, 1998).

Hacia la parte media de la microcuenca de la quebrada El Salado se ha mapeado la Unidad Chiguinda, estos materiales forman parte de la denominada serie Loja y domina la parte Sur de la Cordillera Real, litológicamente encontramos cuarcitas y filitas negras, vale mencionar que resulta particular la aparición de esta formación sobre la zona de estudio puesto que se trata de rocas muy antiguas. Hacia la parte baja de la microcuenca se identifican materiales mayoritariamente volcánicos conformando tobas estratificadas de grano fino, lapilli correspondientes a la denominada formación Nabón. Sobre las márgenes del río Pamar podemos encontrar depósitos aluviales de pequeña extensión y potencia, formados por clastos decimétricos hasta arenas.

**Planificación de intervención en campo y logística.-** El estrato muestral definido fueron áreas de uso agrícola con pendientes inferiores a 20°, una vez definidas cartográficamente estas áreas se procedió a la ubicación de posibles sitios de muestreo, ver Figura 2.

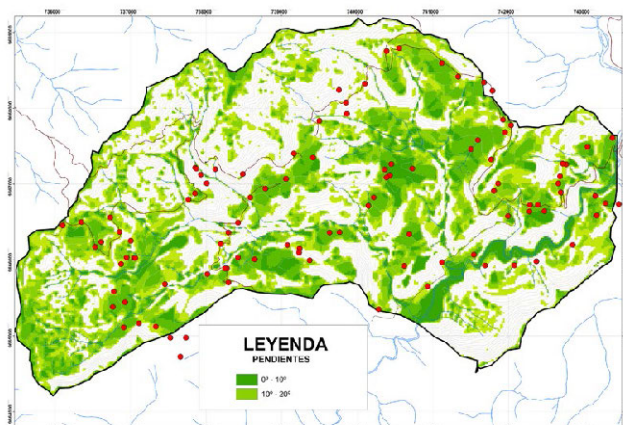


Figura 2.- Zonas de pendiente menor a 20° y puntos de muestreo

**Toma de muestras en suelos.-** Las muestras fueron tomadas previo el consentimiento de los propietarios sobre suelo de uso agrícola a treinta centímetros bajo la superficie por lo que fue necesaria la excavación respectiva. La muestra en cantidad de 3 kilos aproximadamente fue enfundada y etiquetada con un código secuencial del toma y los datos de ubicación espacial tomada con GPS en el sistema WGS 84, ver Figura 3. Fueron necesarios 10 días para la obtención de los 106 muestras de suelo que incluyen dos muestras tomadas sobre el material en el sitio de la relavera que finalmente fueron excluidos del posterior análisis estadístico por no pertenecer al estrato definido.

**Preparación mecánica de muestras.-** Las muestras previo a su análisis de laboratorio fueron objeto de una preparación que incluyó:

- Secado en un horno eléctrico;
- Conminución del material recolectado en un molino de suelos y mortero;
- Clasificación, se utilizó el material pasante de la malla número 200 (75um); cuarteo y lixiviación, preparación química de la muestra.



Figura 3.- Toma y etiquetado de muestras.

**Ensayos de laboratorio.-** para la determinación de la presencia de metales pesados Pb, Zn, Cd, las muestras de suelo fueron analizadas en polarógrafo para determinar los índices de Cd, mientras las concentraciones de Pb y Zn fueron determinadas por adsorción atómica.

**Validación de muestras - análisis exploratorio de datos.-** las muestras tomadas incluyeron dos datos que se los excluyó por no corresponder al estrato muestral definido (suelos agrícolas), estas muestras fueron tomadas de la relavera de la mina (M105, M106) como referencias de concentración de sitio.

Los resultados de laboratorio fueron analizados estadísticamente de modo de definir parámetros descriptivos como fase previa a la definición del método geoestadístico a aplicar, ver Figura 4, 5 y 6. Para el Pb y Zn fueron validados todos los puntos muestrales, estadísticamente no siguen una distribución normal pero los datos pueden ser normalizados mediante ajuste logarítmico. Para el caso del Cd se excluyeron dos puntos por presentar valores extremos que no pueden ser justificados técnicamente.

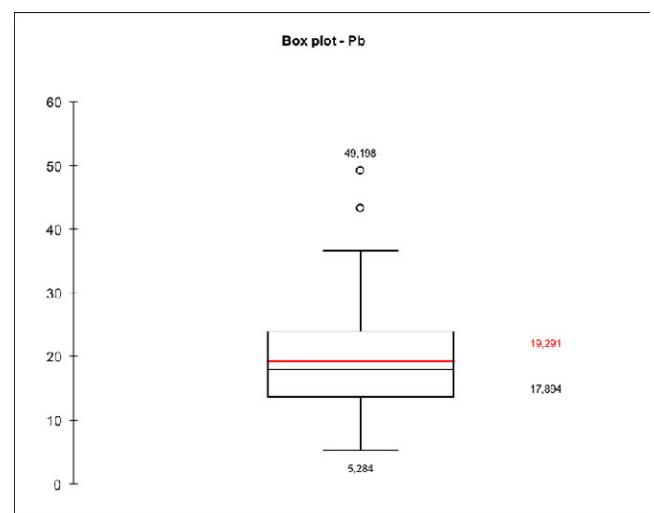


Figura 4.- Diagrama de caja para valores muestrales de Pb.

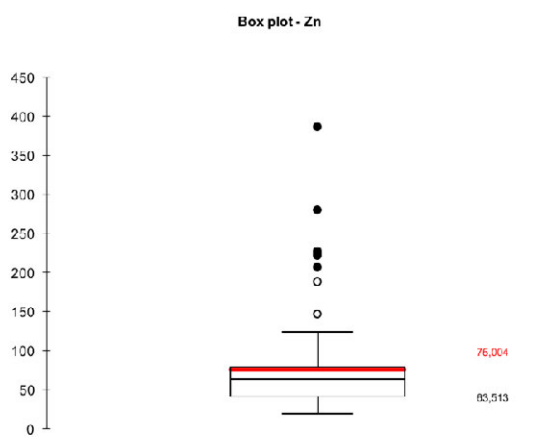


Figura 5.- Diagrama de caja para valores muestrales de Zn.

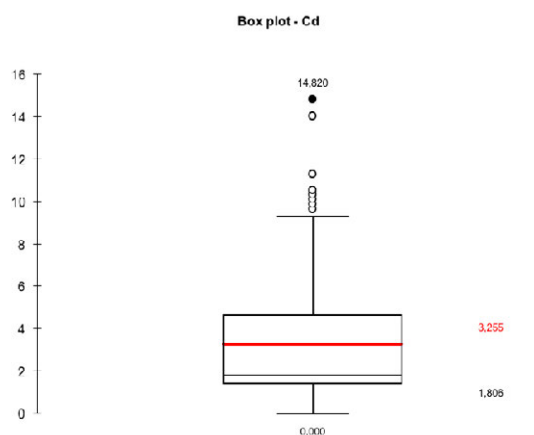


Figura 6.- Diagrama de caja para valores muestrales de Cd.

**Análisis y tratamiento de la información.-** Los criterios para la selección del método geoestadístico consideraron la distribución y comportamiento espacial de los datos (anisotropía) definiéndose como mejor alternativa la utilización del interpolador krigin universal para el Pb y Zn y el interpolador inverso de la distancia (IDW) para el Cd, vale aclarar que este último método no es considerado como geoestadístico pero su aplicación asemeja más a éstos que los métodos clásicos de interpolación.

Los resultados obtenidos fueron trabajados hasta obtener una delimitación espacial de rangos de concentraciones para los metales pesados analizados de acuerdo a la normativa ambiental ecuatoriana indicada en el Libro VI Anexo 2 “Norma de Calidad Ambiental del Recurso Suelo y Criterios de Remediación para Suelos Contaminados”, en este mismo cuerpo legal se indican los “Factores Indicativos de Contaminación” mediante el cual se define el grado de perturbación sobre cada parámetro, ver Tabla I.

**TABLA I**  
FACTORES INDICATIVOS DE CONTAMINACIÓN, TULAS, LIBRO VI ANEXO 2.

FACTOR DE CONTAMINACIÓN (CONCENTRACIÓN PRESENTE/ VALOR DE FONDO)	GRADO DE PERTURBACIÓN	DENOMINACIÓN
< 1,51	0	Cero o perturbación insignificante
1,5 - 3,0	1	Perturbación evidente
3,0 - 10,0	2	Perturbación severa
> 10,0	3	Perturbación muy severa

### III. RESULTADOS

**Dispersión de Pb.-** el modelo de dispersión de Pb mostró un comportamiento razonable con valores entre 25 y 30 ppm sobre las inmediaciones de la mina y relavera e inferiores a 15 ppm hacia las partes medias y bajas de la zona de estudio, la anisotropía es marcada en dirección Noroeste - Sureste.

El mapa de interpolación fue reclasificado considerando el valor máximo permitido para calidad de suelos del Libro VI Anexo 2 que para Pb indica 25 ppm. Ver Figura 7.

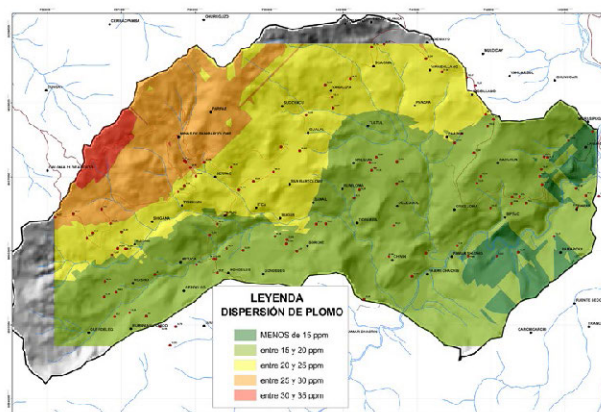


Figura 7.- Mapa de concentraciones esperadas de Pb.

Considerando como valor de fondo la concentración mínima esperada (13.53 ppm) se ha determinado que el valor máximo de concentración presente/valor de fondo es de 2.8.

El área correspondiente a perturbación insignificante alcanza los 1329 ha y perturbación evidente 918 ha. Ver Figura 8.



Figura 8.- Mapa de clasificación por Factor de Contaminación de Pb.

**Dispersión de Zn.-** de similar forma que con el plomo, el modelo de dispersión de Zn mostró un comportamiento razonable con valores mayores a 130 ppm sobre las inmediaciones de la mina y relavera y parte baja de la microcuenca Sorche, valores menores a 60 ppm se muestran hacia las partes bajas de la zona de estudio, la anisotropía es marcada en dirección Noroeste - Sureste.

El mapa de interpolación fue reclasificado considerando el valor máximo permitido para calidad de suelos del Libro VI Anexo 2 que para Zn indica 60 ppm. Ver Figura 9.

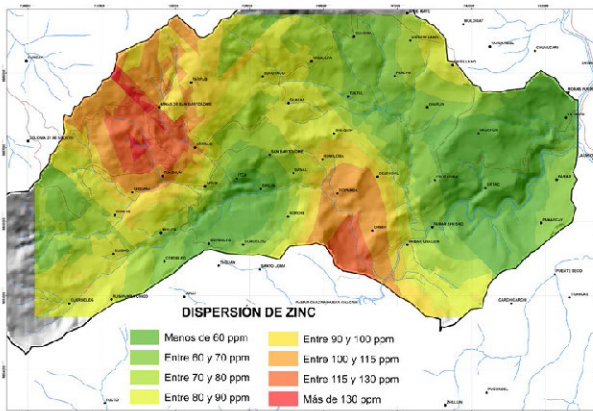


Figura 9.- Mapa de concentraciones esperadas de Zn.

Considerando como valor de fondo la concentración mínima esperada (40.16 ppm) se ha determinado que el valor máximo de concentración presente/valor de fondo es de 3.7.

El área correspondiente a perturbación insignificante alcanza las 432 ha, perturbación evidente 1733 ha y con perturbación severa 81ha. Ver Figura 10.

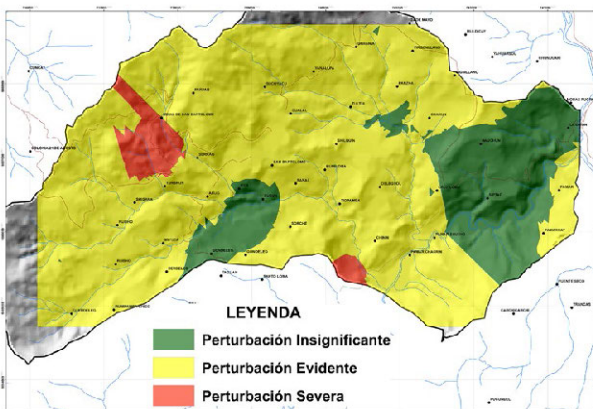


Figura 10.- Mapa de clasificación por Factor de Contaminación de Zn.

**Dispersión de Cd.-** el modelo de dispersión de Cd mostró concentraciones anómalas de forma dispersa, lo que no pudo ser justificado de forma razonable vinculándolo con la presencia de la mina y zona de relaveras. Las concentraciones encontradas muestran varios puntos con valores sobre los 10 ppm ubicados de forma dispersa sobre el área de estudio. Ver Figura 11.

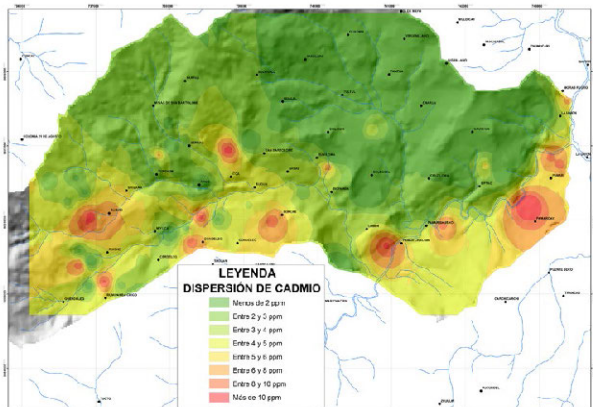


Figura 11.- Mapa de concentraciones esperadas de Cd.

Considerando como valor de fondo la concentración base indicada en Libro VI Anexo 2, Criterios de Calidad de Suelo, (0,5 ppm) se ha determinado que el valor máximo de concentración presente/valor de fondo es de 29.62.

El área correspondiente a perturbación insignificante alcanza las 733 ha, perturbación evidente 756 ha, con perturbación severa 639 ha y con perturbación muy severa 118 ha. Ver Figura 12.

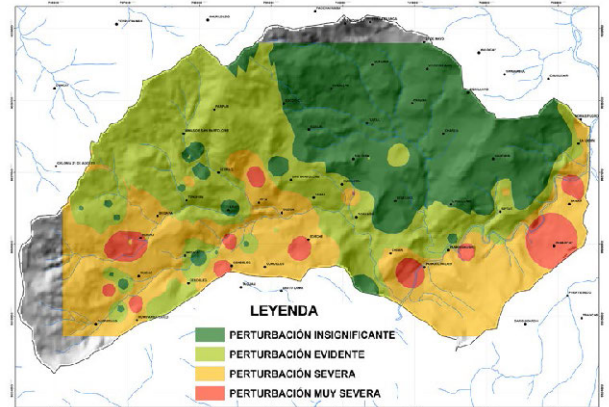


Figura 12.- Mapa de clasificación por Factor de Contaminación de Cd.

**Zonificación por concentración de metales pesados.-** se elaboró una zonificación de riesgo por concentración de metales pesados combinando los pesos de clases de rangos de concentraciones de Pb, Cd, y Zn, se consideraron para cada metal pesado los límites máximos permisibles en la normativa ecuatoriana, el producto final define tres zonas: Riesgo Alto, Medio y Bajo, ver Figura 13. Por el estrato muestral utilizado (áreas de uso agrícola), el riesgo asociado se refiere a la posibilidad que los metales presentes en el suelo puedan introducirse a la cadena trófica humana por medio de los cultivos.

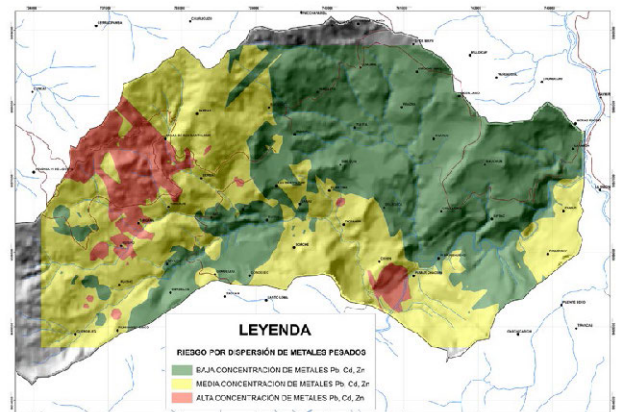


Figura 13.- Zonificación de riesgo de contaminación por presencia de metales pesados.

**IV. CONCLUSIONES**

La dispersión de minerales y la formación del paisaje geoquímico es un proceso natural relacionado con la dinámica geológica de la corteza terrestre, la presencia de concentraciones anómalas de minerales y en este caso específico de metales pesados pueden ser relacionados también a procesos antrópicos como la minería.

Los factores de contaminación indicados en el Libro VI Anexo 2 han resultado relevantes para el Zn y el Cd en donde se encuentran caracterizaciones de perturbación severa y muy severa.

Los modelos de dispersión de Pb sigue una lógica espacial respecto a la ubicación de la relavera de la mina de San Bartolomé, los valores alcanzados por la interpolación Krigin Universal muestran zonas con concentraciones esperadas de hasta 35 ppm que comparados con investigaciones similares en otras localidades se muestran relativamente bajos (Beane, 2016), y siendo los valores superiores de concentración de Pb en la corteza continental de 17 ppm (Khalil, 2012).

Los modelos de dispersión geoquímica generados por interpolación geoestadística muestran valores coherentes y correlacionados para y entre el Pb y el Zn, esta coherencia se basa en el hecho de encontrar la fuente de emisión de metales pesados en la zona del depósito mineral y la relavera, aquí con concentraciones relativamente altas y más bajas conforme se aleja del sitio. Mientras tanto los valores de Cd muestran un comportamiento caótico al encontrarse valores anómalos altos sin relacionarse con la fuente de emisión indicada anteriormente. El modelo de dispersión generado y los valores proyectados sugiere la existencia de un mecanismo no relacionado con la mina y relavera de San Bartolomé como fuente de dispersión de Cd.

La normativa ambiental ecuatoriana establece el límite de calidad en suelos para remediación en 25 ppm para el Pb, considerando esta última referencia el área en la zona de estudio en donde se espera superar este límite alcanza el 48% de cobertura, sin embargo de aquello vale indicar también que el límite máximo permisible para suelos de uso agrícola es de 100 ppm, encontrándose toda el área por debajo de este valor.

Similares comportamientos encontramos para los resultados de Zn, su modelo de dispersión muestra valores de predicción máximos de 130 ppm, estos valores también se ubican en los alrededores de la mina y relavera, el valor en la corteza es de 71 ppm, relativamente en comparación con estudios en otras minas son valores bajos (Islam, 2015).

Los valores definidos por el modelo predictivo de Cd aplicando el método inverso de la distancia muestran concentraciones altas hacia las riberas de la quebrada Sorche y Río Bolo, la norma de calidad de suelos indicada en el TULSMA indica como valor de referencia 0.2 ppm, el límite máximo permisible para suelos en remediación y uso agrícola en 2.0 ppm. Varios puntos de muestreo indican valores sobre los 14 ppm. Estas lecturas no se pueden justificar por la influencia de la fuente fija (relavera) por lo que deben realizarse comprobaciones de los datos referidos.

El mapa de riesgo por concentración de metales pesados delimita la zona con mayor incidencia de concentraciones medidas por lo que representa el espacio sensible en función de desarrollar actividades de tipo agrícola, es decir esta zona debería ser objeto de control sanitario por la incidencia a la fijación y absorción de metales pesados en especies vegetales.

Los valores de concentración de metales pesados encontrados para Pb y Zn no superan los valores máximos permisibles para suelo de uso agrícola en la zona de estudio a excepción de las inmediaciones de la relavera.

Los resultados de la muestra tomada en la relavera mostraron concentraciones elevadas de Pb, Cd y Zn, lo que sumado a la inexistencia de un manejo ambiental de control de lixiviados hacen imprescindible la necesidad de contar con un plan de acción tendiente a la recuperación ambiental de la zona de incidencia (zonas de producción agrícola). Componentes principales del plan de acción incluiría la realización de un monitoreo permanente de la concentración de metales pesados en sedimentos fluviales y el agua de los drenajes a la salida de la relavera. La caracterización de la piscina de relaves facilitaría la determinación de medidas de manejo sobre el pasivo ambiental existente y que evidentemente es la fuente de generación de la dispersión de metales Pb y Zn presentes en la zona de estudio.

## AGRADECIMIENTOS

Manifestamos el agradecimiento al Vicerrectorado de Investigaciones de la Universidad del Azuay por el apoyo brindado para la elaboración del presente estudio.

## REFERENCIAS

- Islam, M. S., Ahmed, M. K., Raknuzzaman, M., Habibullah -Al- Mamun, M., & Islam, M. K. (2015). Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country. *Ecological Indicators*, 48, 282-291. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.016>
- Khalil, A., Hanich, L., Bannari, A., Zouhri, L., Pourret, O., & Hakkou, R. (2013). Assessment of soil contamination around an abandoned mine in a semi-arid environment using geochemistry and geostatistics: Pre-work of geochemical process modeling with numerical models. *Journal of Geochemical Exploration*, 125, 117-129. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2012.11.018>
- PRECUPA. (1998). Informe final, componente B, geología. Cuenca.
- Rehman, Z. U., Khan, S., Brusseau, M. L., & Shah, M. T. (2017). Lead and cadmium contamination and exposure risk assessment via consumption of vegetables grown in agricultural soils of five-selected regions of Pakistan. *Chemosphere*, 168, 1589-1596. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.11.152>
- Tapoglou, E., Karatzas, G. P., Trichakis, I. C., & Varouchakis, E. A. (2014). A spatio-temporal hybrid neural network-Kriging model for groundwater level simulation. *Journal of Hydrology*, 519, Part, 3193-3203. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.10.040>
- Wang, X. L., Chen, H., Wu, Y., & Feng, Y. (2010). New Techniques for the Detection and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2416-2436. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>
- Wu, Q., Leung, J. Y. S., Geng, X., Chen, S., Huang, X., Li, H., ... Lu, Y. (2015). Heavy metal contamination of soil and water in the vicinity of an abandoned e-waste recycling site: Implications for dissemination of heavy metals. *Science of The Total Environment*, 506, 217-225. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.10.121>
- Yang, S., Zhang, H., Kong, M., Liu, Y., Liu, H., & Xu, R. (2014). Study on surficial soil geochemistry in the high-elevation and -frigid mountainous region: A case of Qulong porphyry copper deposit in Tibet. *Journal of Geochemical Exploration*, 139, 144-151. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.06.001>
- Zhang, X., & Srinivasan, R. (2009). GIS-Based Spatial Precipitation Estimation: A comparison of Geostatistical approaches, 45(4), 894-906.



# Salud y seguridad alimentaria



# Observatorio geográfico de salud y riesgos en México: distribución espacial de la mortalidad infantil en el Estado de México, 2010

Santana Juárez Marcela Virginia<sup>1</sup>, Santana Castañeda Giovanna<sup>2</sup>, Rosales Estrada Elsa Mireya<sup>3</sup>, Pineda Jaimes Noel Bonfilio<sup>4</sup>

1 Facultad de Geografía/Universidad Autónoma del Estado de México  
Toluca/México  
mvsantana7@hotmail.com

2 Facultad de Geografía/Universidad Autónoma del Estado de México  
Toluca/México  
gsantanac@uaemex.mx

3 Facultad de Geografía/Universidad Autónoma del Estado de México  
Toluca/México  
emre2000@hotmail.com

4 Facultad de Geografía/Universidad Autónoma del Estado de México  
Toluca/México  
noelpj2008@hotmail.com

## RESUMEN

El tema de la distribución de la mortalidad infantil forma parte del proyecto del “Observatorio geográfico de salud y riesgos en México”, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

El presente trabajo tiene como objetivo conocer la distribución territorial de la mortalidad infantil en el Estado de México, por clima predominante y características socioeconómicas, para el año 2010.

Material y método: las fuentes de información empleadas son a partir de los cubos dinámicos de la plataforma del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS), los censos de población y vivienda del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). En relación a los tipos de climas se obtuvieron de la base de datos climatológica nacional (sistema CLICOM). Para el caso del grado de marginación ésta es de acuerdo al Consejo Nacional de Población (CONAPO), La escala de análisis es a nivel municipal.

Se calcularon las TMI, se implementaron bases de datos en excel, se elaboraron cuadros sintéticos y se generó la cartografía en ArcMap.

Los principales resultados de la mortalidad infantil en el Estado de México presentan un comportamiento diferencial en el territorio, los municipios con tasas de mortalidad infantil altas y muy altas se localizan en forma dispersa al norte y sur, tanto en ámbitos urbanos como en rurales.

Palabras clave: **Geografía de la salud, Observatorio geográfico, Mortalidad infantil.**

## ABSTRACT

*The issue of distribution of infant mortality is part of the “Geographic Observatory of Health and Risks in Mexico”, funded by the National Council of Science and Technology (CONACYT). The present work aims to analyze the distribution of infant mortality, in the State of Mexico, by the predominant climate, and the relation between socioeconomic characteristic, by 2010.*

*Material and method: the sources of information used are from the dynamic cubes of the*

*platform of the National Health Information System (SINAIS). The population and housing censuses of the National Institute of Statistics and Geography (INEGI). The types of climates were obtained from the national climatological database (CLICOM system). Child mortality rates were calculated, databases were implemented in Excel, synthetic tables were elaborated and cartography was generated in ArcMap. The scale of analysis is at the municipal level.*

*The main results of infant mortality in the State of Mexico show a differential behavior in the territory. The highest mortality rates are located in the North and South of the state, both in urban and rural areas.*

**Keywords:** *Health geography, Geographical observatory, Infant mortality.*

## I. INTRODUCCIÓN

### FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La relación Hombre – Ambiente, fue abordada en un inicio por Hipócrates de Cos (460 A.C.), en su obra: De las aguas, los aires y los lugares, estableció las características que sobre la enfermedad podían ejercer las situaciones geográficas de Asia y de Europa. La importancia del lugar y las condiciones geográficas en la salud humana.

La Doctrina hipocrática, fue una corriente de pensamiento higienista, base de las topografías médicas y de la geografía médica hoy también geografía de la salud.

Las topografías médicas fueron estudios realizados por los médicos sobre las condiciones ambientales y socioeconómicas de los pacientes y constituían verdaderos estudios geográficos. La primera topografía médica fue hecha por el judío Moses ben Samuel de Roquemaure en el siglo XV. La primera topografía médica moderna fue elaborada por Nicolás Francisco San Juan Domingo en el siglo XVII. Las topografías médicas se realizaron durante los siglos XVIII y la primera mitad del siglo XIX, respaldadas por el gobierno, (Urteaga, 1980).

En el siglo XVII, del higienismo se derivan las siguientes teorías: de la constitución epidémica por Thomas Sydenham; y la miasmática por G.M. Lancisi. En el siglo XVIII se derivó la teoría social de la enfermedad por Johann Peter Frank, quien afirmaba que la miseria del pueblo era la madre de todas las enfermedades. En el siglo XIX se derivó la doctrina telúrica, por Max Von Pettenkofer (Urteaga, Op. Cit).

En 1856 John Snow desarrolló la teoría del contagio. Snow elaboró un mapa en el cual ubicó los casos de cólera con puntos, durante la epidemia en Londres de 1854 y las cruces representan los pozos de agua de los que bebían los enfermos. El sugirió cerrar los pozos debido a los casos del cólera y se redujo significativamente este padecimiento. Snow descubrió que el agua estaba contaminada por heces fecales y existían microorganismos causantes del cólera. Snow se considera el padre de la Epidemiología, además su cartografía fue el preámbulo de los Sistemas de Información Geográfica.

A partir de 1880 cobra auge el paradigma de la bacteriológica, con los descubrimientos de Hansen, Luis Pasteur, Eberth, Laveran, Koch y Ferrán en otros científicos. Tuvo un papel importante el microscopio, el abordaje de la enfermedad es a nivel de paciente, dejando de lado las características ambientales y socioeconómicas. En el siglo XX se presentó un gran impulso la bacteriología por más descubrimientos de bacterias o microbios causantes de enfermedades, los antibióticos y las vacunas entre otros. En el siglo XX, en los cuarenta, empezó a entrar en crisis el enfoque higienista, debido a los avances microbiológicos y las topografías médicas se empezaron a llamar geografías médicas (Urteaga, 1980).

En 1920 se reconoce a la geografía médica como disciplina, el pionero fue Maximilien Sorre, en 1955 escribió la obra: Fundamentos biológicos de la geografía humana, en la que elaboró la teoría sobre los complejos patógenos.

En el Congreso Internacional de Geografía en Lisboa en 1949, se otorgó el Reconocimiento oficial de la geografía médica. En 1976 la Comisión de Geografía Médica de la Unión Geográfica Internacional (UGI), en el Congreso de Moscú cambió de denominación a geografía de la salud (Olivera A. 1993).

En 1946, la Organización Mundial de la Salud (OMS) definió a la “Salud como el completo estado de bienestar físico, psíquico y social y no meramente la ausencia de la enfermedad”, actualmente se le ha incorporado el contexto ambiental y se aborda a la salud desde un punto de vista integral de diversas disciplinas, debido a las numerosas relaciones que existen entre el hombre y el medio, dentro de éstas por la geografía, principalmente en la etapa preventiva y de promoción de la salud.

La geografía de la salud es la rama de la geografía que analiza la distribución geográfica de la morbimortalidad y servicios públicos de salud, así como la distribución de los vectores causantes de enfermedades, y su relación con factores geográficos, ambientales sociales, económicos y políticos entre otros. Que con ayuda de las geotecnologías permite diseñar grandes bases de datos, generar cartografía del pasado, del presente y plantear escenarios a futuro mediante la propuesta de modelos, así como realizar análisis geoestadísticos.

Para realizar diferentes técnicas es necesario previamente determinar cuáles variables son las que explican mejor los diferentes patrones de distribución en el comportamiento de algún evento, regularmente la salud de la población es analizada con variables como la mortalidad, morbilidad y servicios a la salud, entre otros.

La mortalidad es uno de los componentes de la dinámica de la población y es una medida para evaluar el estado de salud de la población en términos generales. Por otro lado, uno de los indicadores más importantes para evaluar el desarrollo de los países y de una sociedad es la mortalidad infantil. Por lo que resulta de gran importancia evaluar la relación sobre todo, entre este último indicador y los factores geográficos y socioeconómicos de una sociedad.

Las Naciones Unidas (1995) en el Programa de Acción de la Conferencia Internacional sobre la Población y el Desarrollo, se determina que para el año 2015 todos los países deberían tratar de conseguir que la tasa de mortalidad de lactantes estuviese por debajo de 35 por 1000 nacidos vivos, y la tasa de mortalidad de niños menores de 5 años, por debajo de 45 por 1000 nacidos vivos (Naciones Unidas, 1995).

La Organización Mundial de la Salud (OMS, 2010) menciona que el número de niños menores de cinco años que mueren



cada año se redujo de más de 12 millones en 1990 a 7.6 millones en 2010, estas nuevas cifras muestran que, en comparación con lo que ocurría en 1990, todos los días se salvan las vidas de alrededor de 12 000 niños y niñas.

Entre 1990 y 2010, la tasa de mortalidad de niños y niñas menores de cinco años disminuyó en más de un tercio, de 88 muertes por cada 1000 nacidos vivos a 57, por desgracia, este ritmo de progreso es todavía insuficiente para alcanzar el cuarto Objetivo de Desarrollo del Milenio (ODM 4), que aboga por una reducción de dos tercios en la tasa de mortalidad de los niños y niñas menores de cinco años.

La Organización Panamericana de la Salud (OPS), señala en la Agenda de salud para las Américas, 2008-2017, Aumentar la protección social y el acceso a los servicios de salud de calidad.

#### MATERIALES Y MÉTODOS APLICADOS

La información se obtuvo de fuentes oficiales como del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS), el Consejo Nacional de Población (CONAPO), principalmente.

La tasa de mortalidad infantil (TMI) se obtuvo con la siguiente fórmula (1):

$$TMI = \left( \frac{\text{Nacidos vivos}}{\text{Defunciones menores de 1 año}} \right) * 1\ 000 \quad (1)$$

TMI = Tasa de mortalidad infantil de menores de 1 año.

La población de nacidos vivos, hace referencia a los niños que se registraron en el año 2010 (es decir, que obtuvieron en ese año su acta de nacimiento<sup>1</sup>) y considerando la entidad y municipio en donde ocurrió el nacimiento.

Las defunciones menores a un año, hacen referencia al año en que se registró el deceso y el registro de la ubicación geográfica que se toma en cuenta, es el lugar de residencia, es decir, en donde vivía al momento de la ocurrencia.

La variable de clima, se obtuvo de la base de datos climatológica nacional (sistema CLICOM) el cual es un sistema de software de manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa Climate Computing Project. Los datos corresponden al periodo de 1910-2009; para determinar el tipo de clima predominante se retomó la clasificación que se realizó en el Atlas de Riesgos del Estado México, donde se calculó la medición de la superficie de cada tipo de clima en km<sup>2</sup> a nivel municipal.

Las variables correspondientes a las localidades rurales y de población sin derechohabiente se obtuvieron a partir del censo de población y vivienda de INEGI, 2010, con la finalidad de clasificarlos en cinco rangos utilizando el método de Dalenius & Hodges (1959). Este método consiste en la formación de estratos de manera que la varianza obtenida sea mínima al interior de cada estrato y máxima entre cada uno de ellos, forma estratos lo más homogéneos posible.

La fórmula para obtener el porcentaje de localidades rurales se describe a continuación (2)

$$\% \text{ Localidades rurales} = \left( \frac{L. \text{ rurales}}{\text{Total de localidades}} \right) * 100 \quad (2)$$

L. rurales se refiere al número de localidades rurales que existen en cada municipio, las cuales se dividen entre el total de localidades en el mismo municipio en el mismo año, que en este caso es 2010.

La variable correspondiente a la población no derechohabiente se obtuvo con la siguiente fórmula (3).

$$\% \text{ Población no derechohabiente} = \left( \frac{P. \text{ no derechohabiente}}{\text{Total de población}} \right) * 100 \quad (3)$$

La derechohabiente es el derecho de las personas a recibir atención médica en instituciones de salud públicas y/o privadas, como resultado de una prestación laboral, por ser miembros de las fuerzas armadas, por haber adquirido un seguro voluntario, así como a los familiares designados como beneficiarios en cualquiera de las tres anteriores modalidades, por lo que P. no derechohabiente hace referencia a la población que no goza de esta prestación, esta se divide entre la población total y se multiplica por 100.

La vulnerabilidad de personal médico y unidades médicas por 100,000 habitantes, es un indicador que refleja las condiciones de salud; los mayores valores indican menor vulnerabilidad.

Los servicios básicos en la vivienda, coadyuvan a la salud de la población, se trata de características que rodean el ambiente del individuo, de la familia y de los menores de un año. En este caso se trata del porcentaje de viviendas particulares habitadas con servicios de luz eléctrica, drenaje y agua potable.

Obtenidos los porcentajes de las dos variables antes mencionadas, se prosiguió a transformar los valores con el índice omega, con el objetivo de normalizar los valores de 0 a 100, los valores más cercanos al 100 son los que se consideran los más favorables, este obtuvo utilizando la siguiente fórmula (4).

$$EV_i = \frac{x_i - m}{M - m} * 100 \quad (4)$$

En donde:

EV<sub>i</sub>=Estandarización de la variable

x<sub>i</sub>=Valor del Indicador analizado para la unidad espacial

m=Valor más negativo (de acuerdo al indicador estudiado puede ser el valor más alto o más bajo)

M=Valor más positivo (de acuerdo al indicador estudiado puede ser el valor más alto o más bajo)

Una vez obtenidas las tasas de mortalidad infantil (TMI) y los indicadores antes señalados, se procedió a implementar bases de datos, para la realización de cuadros sintéticos y para la generación de la cartografía.

La representación cartográfica de las TMI, está simbolizada con la clasificación de seis rangos mediante la curva de distribución normal, que toma en cuenta la distancia de la desviación estándar con relación al valor de la media en los datos. El porcentaje de localidades rurales y el porcentaje de la población no derechohabiente se clasificaron en cinco rangos de acuerdo al método de Dalenius y Hodges.

La escala de análisis es a nivel municipal.

<sup>1</sup> El acta de nacimiento es un documento oficial que expide una autoridad competente del registro nacional de las personas, dejando constancia del nacimiento de alguien.

## II. RESULTADOS

### DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LA MORTALIDAD INFANTIL, 2010

Con base en un estudio realizado por el Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF, 2007) la mortalidad infantil es considerablemente más alta en niños que viven en áreas rurales y en el 60% de los hogares de pobreza extrema.

Según Garrocho C. (1995), la mortalidad infantil se relaciona principalmente con la pobreza: analfabetismo, hacinamiento, malnutrición, deficientes servicios a la vivienda como agua potable, drenaje y energía eléctrica; difícil acceso a servicios médicos, mala calidad del medio ambiente, difícil acceso a programas educativos para la salud, entre otros.

En México para el año 2000 se registró una TMI de 20.9 por 1000 nacidos vivos, para el Estado de México fue de 20.98 similar a la nacional.

Para el año 2010 en México se registró una TMI de 14.1 por 1000 nacidos vivos, para el Estado de México se registraron 4843 defunciones de menores de un año con una tasa de 16.12 por mil nacidos vivos, superior a la nacional.

En el Estado de México entre 2000 y 2010 este indicador se redujo en 23.16%, al pasar de 20.98 a 16.12 defunciones por 1000 nacidos vivos. Los factores que han incidido en esta disminución son de diversa índole: sociales, económicos, políticos y culturales como los estilos de vida y la nutrición, entre otros, que en conjunto repercuten en la mejora de la calidad de vida. Sin embargo dichos factores se presentan en forma diferencial en la población y en el territorio lo cual incide en una distribución diferencial de la mortalidad infantil.

Al interior del Estado de México para el año 2010, se presentan diferencias notables entre municipios, continúan registrándose tasas muy elevadas. Los municipios con mayor mortalidad infantil tenían una diferencia de 140 puntos con respecto al de menor mortalidad infantil, los casos extremos son los municipios de Zacazonapan (143 defunciones por 1000 nacidos vivos) y Amatepec (3 defunciones por 1000 nacidos vivos), que muestran los contrastes en el territorio estatal.

Municipios con TMI muy alta suman 3 (2.4% del total de municipios), con tasas en el rango 6 que va de 29.20 a 143 defunciones por 1000 nacidos vivos, superiores a la estatal y nacional, localizados al oriente, centro y sureste, algunos de ellos son: Zacazonapan con 143 defunciones por 1000 nacidos vivos; Almoloya del Río con 33 y Amecameca con 29 defunciones por 1000 nacidos vivos. Según CONAPO (2011), en estas áreas se registró un grado de marginación diferente: medio, bajo y muy bajo, (cuadros 3.2 y 3.4 y figuras 3.7 y 3.8).

Municipios con TMI altas son 7 que indican el 5.6%, que registran tasas en el rango 5 de 22.1 a 29.19 defunciones por 1000 nacidos vivos, superiores a la estatal y nacional, localizados principalmente en el norte y sur del Estado de México; como Coyotepec con 25; Coatepec Harinas con 25; Aculco con 23; Tenango del Aire con 23; y Almoloya de Alquisiras con 22, entre otros.

Los municipios que presentan una TMI media altas son 39 (31.2%), en el rango 4 de 15.65 a 22.09 defunciones por 1000 nacidos vivos, superiores a la estatal y nacional, se localizan en el centro y centro sur, como Villa Guerrero con 21; Tianguistenco con 21; Amanalco con 21; Acolman con 21; y Atizapan con 20.

Los municipios que tienen TMI media bajas son 60 (48%), en el rango 3 de 9.55 a 15.64 defunciones por 1000 nacidos vivos, superiores a la estatal y nacional, se localizan en forma dispersa en el contexto estatal, como los municipios de Texcal-

yacac con una tasa de 16; Texcoco con 15; Chimalhuacan con 15; Valle de Bravo con 15 y Tlalmanalco con 15, entre otros.

Los municipios que registran TMI bajas suman 15 (12%), en el rango 2 de 3.36 a 9.54 defunciones por 1000 nacidos vivos; localizados en forma dispersa en el Estado de México, como Tequixquiac con una tasa de 9; Oztoloapan con 9; Tezoyuca con 9; Chiconcuac con 8 e Isidro Fabela con 8, entre otros; en el municipio de Amatepec se registró la TMI más baja con solo 3 defunciones por cada 1000 nacidos vivos (figura 1).

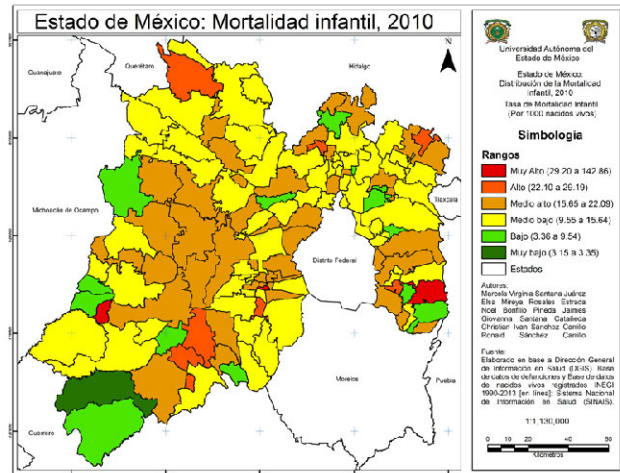


Figura 1. Estado de México. Distribución de la mortalidad infantil, 2010

### TASAS DE MORTALIDAD INFANTIL Y CLIMA PREDOMINANTE EN EL 2010

Con respecto a los tipos de clima se consideró en esta investigación el clima predominante por municipio. En el Estado de México se presentan seis tipos de climas predominantes (figura 2 y tabla I).

El clima templado subhúmedo C(w2)(w)b(i)g se distribuye principalmente en el centro y norte; el clima semifrío subhúmedo C(E)(w2)(w)b(i)g, se distribuye principalmente en el centro, y oriente del Estado de México, así como pequeñas porciones al noroeste. El clima cálido subhúmedo Awo(w)(i)g, se localiza al suroeste del estado. También la entidad cuenta con el tipo de clima seco Bs1k(w)(i)g, se localiza al noreste del Estado. El clima semicálido subhúmedo A(c)w1(w)b(i)g, se caracteriza por ser el más cálidos de los templados se localiza al sur del estado y colinda con los estados de Guerrero y Morelos. Por último el clima frío E(T)H, localizado básicamente en las mayores elevaciones del Estado.

El clima templado subhúmedo C(w2)(w)b(i)g, es predominante en 81 municipios (64.8%). Las TMI muy altas y altas se registran en 2 y 6 municipios respectivamente; las tasas media altas y media bajas se presentaron en 28 y 39 municipios respectivamente; por último las tasas bajas en 6 municipios.

Esta situación implica que se trata de municipios saludables en términos de las TMI, porque el 36% del total de municipios presentan tasas media bajas y bajas, mientras que el 28.8% del total de municipios registran tasas media altas, altas y muy altas (tabla I).

El clima seco Bs1k(w)(i)g, es predominante en 21 municipios (16.8%), de los cuales cuatro tienen TMI baja; once con tasa media baja; y con tasas media alta y alta en cinco y un municipios respectivamente.

Esto significa que en este clima se tiene una situación de salud favorable porque la mayoría de los municipios en este clima tienen tasas en los rangos de bajas y media bajas.

El clima semicálido subhúmedo A(c)w1(w)b(i)g, es predominante en ocho municipios (6.4%), de los cuales cinco registran TMI media baja, dos una tasa baja y un municipio tasa media alta. Esta situación indica que en este clima se presentan condiciones de salud favorables debido a que imperan los municipios con TMI media bajas y bajas.

El clima semifrío subhúmedo C(E)(w2)(w)b(i)g, es predominante en ocho municipios (6.4%), de los cuales tres registran TMI media baja; uno con tasa baja y cuatro con tasa media alta respectivamente. Esta situación indica que en este clima se presentan problemas en salud debido a que imperan los municipios con TMI muy altas y altas.

El clima cálido subhúmedo Awo(w)(i)g, es predominante en siete municipios (5.6%), de los cuales en los rangos de mortalidad infantil media baja, baja y muy baja se registran dos, dos y un municipio respectivamente; y un municipio en el rango de mortalidad media alta y muy alta. Esto indica que se trata de municipios saludables en términos de TMI porque la mayoría de ellos registran tasas en los rangos medio bajos y bajos.

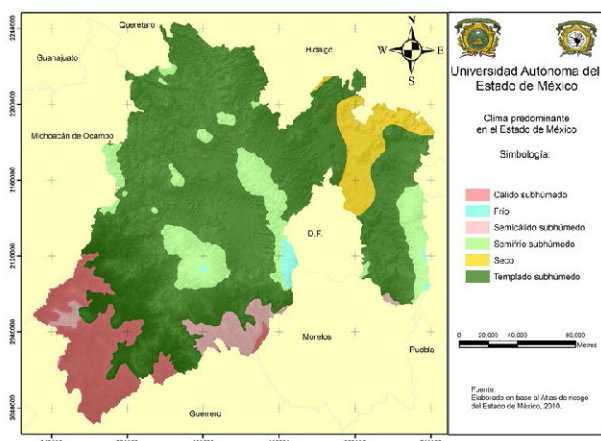


Figura 2. Estado de México. Climas predominantes

**TABLA I**  
Estado de México: Tipo de clima y tasa de mortalidad infantil (TMI), 2010 (número de municipios)

CLIMA	TMI						Total	%
	Muy Alta	Alta	Media Alta	Media Baja	Baja	Muy Baja		
Cálido subhúmedo	1	0	1	2	2	1	7	5.6
Seco	0	1	5	11	4	0	21	16.8
Semicálido	0	0	1	5	2	0	8	6.4
Semifrío subhúmedo	0	0	4	3	1	0	8	6.4
Templado subhúmedo	2	6	28	39	6	0	81	64.8
<b>Total</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>39</b>	<b>60</b>	<b>15</b>	<b>1</b>	<b>125</b>	<b>100</b>
<b>%</b>	<b>2.4</b>	<b>5.6</b>	<b>31.2</b>	<b>48</b>	<b>12</b>	<b>0.8</b>	<b>100</b>	

Fuente: Elaborado sobre la base del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS, 2010) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010).

### TASAS DE MORTALIDAD INFANTIL Y LOCALIDADES RURALES EN EL 2010

En el Estado de México, existen un total de 4,844 localidades, de las cuales 4,311 son rurales, que indica el 89%, lo que indica una gran dispersión de la población y un desafío para la salud infantil.

La correlación Pearson no es significativa con un valor de 0.08, esto indica que las tasas de mortalidad infantil altas o muy altas no precisamente se registran en municipios con porcentajes significativos de localidades rurales.

Los municipios con porcentajes muy altos (de 87.51 a 100%) en localidades rurales suman 57 (46% del total) de los cuales 9 y 29 registran tasas bajas y media bajas de mortalidad infantil; 12 con tasas media altas, 4 con tasas altas y 2 con tasas muy altas.

Los municipios con porcentajes altos de 81.26 a 87.50 en localidades rurales suman 20 (16 % del total), de los cuales 8 tienen tasas medio bajas y 1 con tasas bajas respectivamente, lo que indica que se trata de municipios en mejores condiciones de salud. En relación a la TMI media alta esta se presenta en 11 municipios.

Los municipios con porcentajes medios de localidades rurales que van de 68.68 a 81.25 suman 31 (25% del total de municipios) de los cuales predominan TMI bajas y media bajas en 2 y 17 municipios respectivamente, lo que indica que se presentan mejores condiciones de salud.

Los municipios con porcentajes de localidades rurales en el rango bajo registran TMI principalmente media altas y altas en 4 y 1 municipio correspondientemente, que indica también condiciones poco favorables en salud. Las TMI con rango medio bajo y bajo se registran en 2 y en 1 municipio.

En los municipios con localidades rurales en el rango muy bajo de 0.0 a 50.00% se registran TMI principalmente medio bajas y bajas en 4 y 2 municipios, que indica mejores condiciones de salud (figura 3 y tabla II).

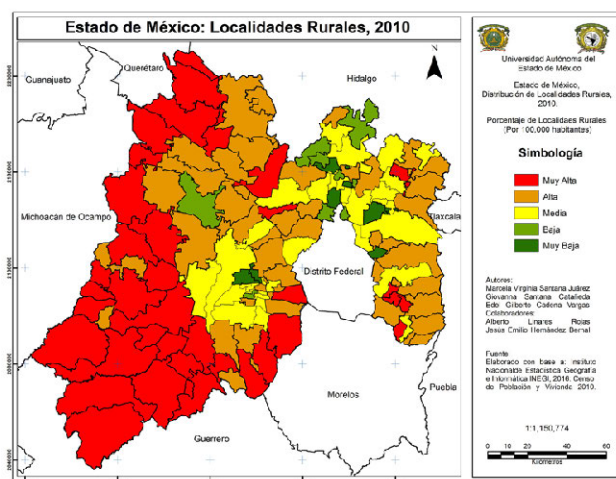


Figura 3 Estado de México, Distribución de localidades rurales, 2010

**TABLA II**

Estado de México: localidades rurales y TMI, 2010 (número de municipios)

LOC.RUR	TMI						Total	%
	Muy Alta	Alta	Media Alta	Media Baja	Baja	Muy Baja		
Muy Alta (87.5-100)	2	4	12	29	9	1	57	45.6
Alta (81.2-87.5)	0	0	11	8	1	0	20	16
Media (66.6-81.2)	1	2	9	17	2	0	31	24.8
Baja (50.1-66.6)	0	1	4	2	1	0	8	6.4
Muy Baja (0.0 - 50.0)	0	0	3	4	2	0	9	7.2
Total	3	7	39	60	15	1	125	100
%	2.4	5.6	31.2	48	12	0.8	100	

Fuente: Elaborado sobre la base del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS, 2010) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010).

**TASA DE MORTALIDAD INFANTIL Y GRADO DE MARGINACIÓN**

Para el año 2010, la distribución de la marginación en el Estado de México mostró un comportamiento en grupos diferenciados, uno de ellos con grado de marginación (GM) muy bajo (38 municipios) y bajo (36 municipios) en las zonas metropolitanas del Valle de México y de Toluca, que indicaron el 30.4% y el 28.8% de la entidad; otro grupo conformado por municipios con GM media localizados al noroeste y sur de la entidad, con 39 municipios que indicaron el 31.2% estatal; otro grupo integrado por municipios con GM muy alto (1.6%) y alto (8%) localizados al centro oeste y suroeste de la entidad con 2 y 10 municipios respectivamente. Aquellos con GM muy alto son Sultepec y Zacualpan, ubicados al suroeste de la entidad (figura 4).

La correlación Pearson entre las tasas de mortalidad infantil y el grado de marginación no es significativa es de -0.03, esto indica que las tasas de mortalidad infantil no necesariamente se registran en municipios con grados de marginación alto o muy alto.

El grado de marginación con rango muy alto se presenta en dos municipios, mismos que registran mortalidad infantil media baja.

Con relación al rango alto de marginación se registra en 10 municipios en los cuales se tiene MI muy baja, baja y media baja en siete municipios (5.6% del total de municipios), en los rangos de MI media alta se presentaron tres municipios.

La marginación con rango medio, se registra en 39 municipios (31.2%), en los cuales se registran los mayores valores de MI en el rango media baja y media alta en 18 y 11 municipios respectivamente (23%), además 5 municipios con tasa de MI baja; 4 con tasa alta y un municipio con tasa muy alta.

La marginación con rango bajo se presenta en 36 municipios (28.8%) de los cuales, registran tasas de MI bajas y media bajas en 5 y 15 municipios respectivamente (16%). Las tasas de TMI muy altas, altas y media alta se registran en 2, 3 y 11 municipios.

La marginación con rango muy bajo, se presentan en 38 municipios (30.4%), con tasas de MI bajas y media bajas en 22 y 3 municipios respectivamente (20%), las tasas de MI con rango

media alta, se presentan en 13 municipios respectivamente (figura 4 y tabla III).

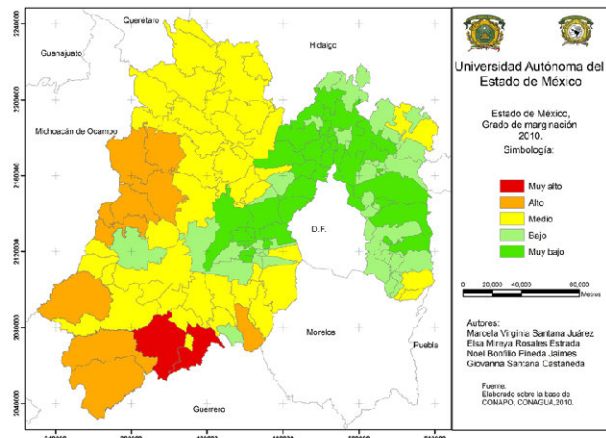


Figura 4 Estado de México. Grado de marginación, 2010

**TABLA III**

Estado de México: grado de marginación y TMI, 2010 (número de municipios)

GM	TMI						Total	%
	Muy Alta	Alta	Media Alta	Media Baja	Baja	Muy Baja		
Muy Alto	0	0	1	1	0	0	2	1.6
Alto	0	0	3	4	2	1	10	8
Medio	1	4	11	18	5	0	39	31.2
Bajo	2	3	11	15	5	0	36	28.8
Muy Bajo	0	0	13	22	3	0	38	30.4
Total	3	7	39	60	15	1	125	100
%	2.4	5.6	31.2	48	12	0.8	100	

Fuente: Elaborado sobre la base del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS, 2010) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010).

**TASAS DE MORTALIDAD INFANTIL Y POBLACIÓN NO DERECHOHABIENTE**

En el Estado de México, para el año 2010, se tenían 15, 175,862 habitantes, de los cuales 6, 128,990 es población no derechohabiente, lo que significa el 40% del total de población.

El coeficiente de correlación de Pearson entre las tasas de mortalidad infantil y la población no derechohabiente no es significativa es de -0.05, esto indica que no necesariamente las tasas de mortalidad infantil altas o muy altas se registran en municipios con altos o muy altos porcentajes de población no derechohabiente.

La población no derechohabiente en el rango muy alto de 68.86 a 100% se presenta en 17 municipios (13.6% del total) de los cuales imperan TMI medias altas y muy altas en 8 y 1 municipio respectivamente (7.2%).

El porcentaje que va de 50.08 a 68.85% (rango alto) de población no derechohabiente registra 32 municipios, la mayoría en rangos media baja y baja de TMI con 19 y 3 municipios cada uno.

El rango bajo de población no derechohabiente que va de 18.78 a 37.55%, es el que registra más municipios (35) con TMI, el porcentaje más alto se encuentra en el rango medio bajo de TMI con 17 municipios que representan el 13.6% con respecto al total (figura 5 y tabla IV).

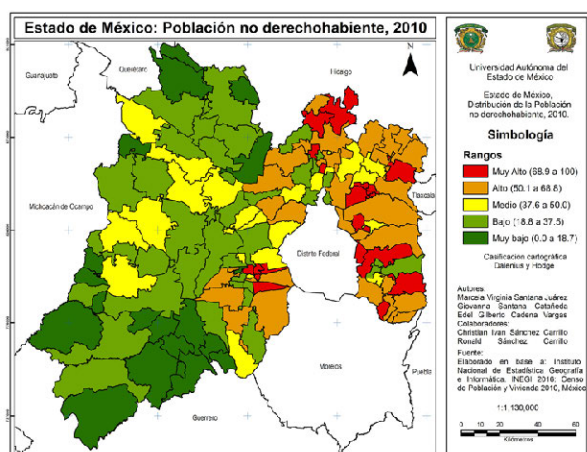


Figura 5 Estado de México. Población no derechohabiente, 2010

**TABLA IV**  
Estado de México: población no derechohabiente y TMI 2010 (número de municipios)

POB. NO DERECHOHABIENTE	TMI						Total	%
	Muy Alta	Alta	Media Alta	Media Baja	Baja	Muy Baja		
Muy Alto (68.9 - 100)	1	0	8	4	4	0	17	13.6
Alto (50.1 - 68.8)	1	2	7	19	3	0	32	25.6
Medio (37.6 - 50.0)	0	1	9	11	1	0	22	17.6
Bajo (18.8 - 37.5)	0	1	13	17	3	1	35	28.0
Muy Bajo (0.0 - 18.7)	1	3	2	9	4	0	19	15.2
Total	3	7	39	60	15	1	125	100
%	2.4	5.6	31.2	48	12	0.8	100	

Fuente: Elaborado sobre la base del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS, 2010) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010).

**TASAS DE MORTALIDAD INFANTIL Y VULNERABILIDAD CON RESPECTO A PERSONAL MÉDICO**

En el Estado de México, para el año 2010, se tenían 15, 175,862 habitantes, con 12,501 personal médico, con una proporción de 82 personal médico por 100,000 habitantes.

La escasez de personal sanitario, su distribución geográfica desigual y los desequilibrios de la distribución de sus aptitudes suponen importantes obstáculos y vulnerabilidad en personal médico.

En el Estado de México, para el año 2010 la vulnerabilidad muy alta comprende de 1.18 a 54.13 personal médico por 100,000 habitantes, que indica mayor vulnerabilidad en salud infantil, en específico las tasas de mortalidad infantil, en este rango se registran 37 municipios (29.6% del total). La vulnerabilidad alta comprende de 56.80 a 91.66 e incluye a 31 municipios (24.8%); el rango medio es de 93.70 a 128.64, y se tienen 22 municipios (17.6%); el rango de baja vulnerabilidad es de 130.85 a 182.11 y se tienen 24 municipios e indica el 19.2%; por último la vulnerabilidad muy baja incluye del 187.9 a 301 personal médico por 100,000 habitantes, en el cual se tienen 11 municipios (8.8% del total), figura 6.

Las tasas de mortalidad infantil muy altas se registran en 3 municipios (2.4% del total), en los cuales se presenta vulnerabilidad media y baja; la tasa de mortalidad alta se presenta en 7 municipios (5.6%), de los cuales 2, 2 y 3 tienen vulnerabilidad muy alta, alta y baja respectivamente; en el rango de la TMI medio alta se presentaron 39 municipios (31.2%), de los

cuales 11 tienen muy alta vulnerabilidad, 12 y 9 tienen una vulnerabilidad alta y media y 7 municipios presentan vulnerabilidad baja y muy baja

Las tasas de mortalidad infantil media baja se registran en 60 municipios (48%), en los cuales se presentan vulnerabilidad principalmente muy alta en 18 municipios y alta en 14; en el rango medio y bajo de vulnerabilidad se tiene 11 y 10 municipios respectivamente; y en el rango de vulnerabilidad muy bajo se tienen registrados 7 municipios.

Las tasas de mortalidad infantil en el rango bajo se registran 15 municipios (12%), en los cuales en el rango de muy alta vulnerabilidad se localizan 6; En el rango de baja vulnerabilidad se cuenta con 5 municipios respectivamente.

Las tasas de mortalidad infantil muy baja se registran en 1 municipio (0.8%), este ubicado en el rango de vulnerabilidad bajo.

Los rangos de vulnerabilidad en personal médico muy alto y alto concentran el 55.2% del total de municipios; en el rango medio se localizan el 16.8%; y en los rangos de baja y muy baja vulnerabilidad se ubica el 28% del total de municipios del Estado de México, (tabla V).

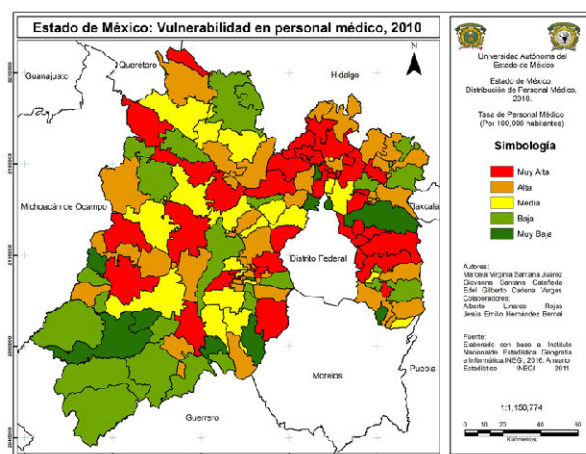


Figura 6 Estado de México. Vulnerabilidad en personal médico, 2010

**TABLA V**  
Estado de México: mortalidad infantil y vulnerabilidad con respecto a personal médico 2010 (número de municipios)

P. MÉDICO	TMI						Total	%
	Muy Alta	Alta	Media Alta	Media Baja	Baja	Muy Baja		
Muy Alto (81.4 - 100)	0	2	11	18	6	0	37	29.6
Alto (68.9 - 81.3)	0	2	12	14	4	0	32	25.6
Medio (56.4 - 68.8)	1	0	9	11	0	0	21	16.8
Bajo (37.6 - 56.3)	2	3	4	10	5	1	25	20
Muy Bajo (0.0 a 37.5)	0	0	3	7	0	0	10	8
Total	3	7	39	60	15	1	125	100
%	2.4	5.6	31.2	48	12	0.8	100	

Fuente: Elaborado sobre la base del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS, 2010) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010).

**TASAS DE MORTALIDAD INFANTIL Y VULNERABILIDAD CON RESPECTO A UNIDADES MÉDICAS**

La disponibilidad de servicios de salud se basa en la puesta en marcha de las unidades médicas y hospitales mediante la



que cuentan con luz eléctrica. La mayoría de municipios: cinco registran un rango alto de viviendas particulares habitadas que cuentan con luz eléctrica; en el rango medio se tienen dos municipios y en el rango bajo uno.

Las TMI media altas se registran en 16 municipios (12.8%), de los cuales la proporción de viviendas particulares habitadas que cuentan con luz eléctrica en los rangos alto, bajo y muy bajo se incluyen cuatro municipios respectivamente; en el rango muy alto se registran tres municipios; y en el rango medio uno.

Las TMI media bajas se registran en 31 municipios (24.8% del total), de los cuales 15 se incluyen en el rango alto de viviendas particulares habitadas que cuentan con luz eléctrica; en el rango bajo se incluyen cinco municipios; en los rangos muy alto y muy bajo se registran cuatro municipios respectivamente; y en el rango medio se tienen tres municipios.

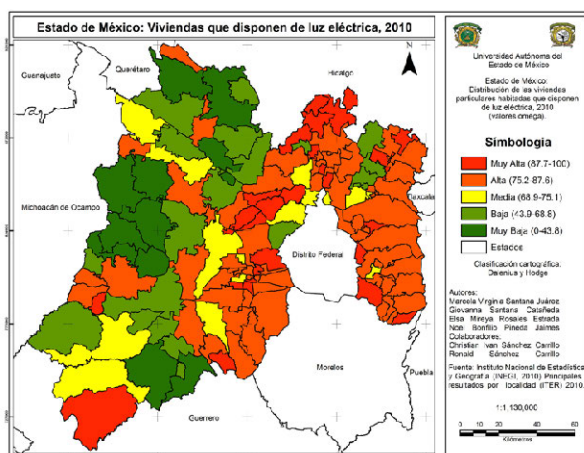


Figura 8. Estado de México. Viviendas que disponen de luz eléctrica, 2010

Las TMI bajas se registran en 53 municipios (42.4% del total), de las cuales en su mayoría están en los rangos muy alto y alto de viviendas particulares habitadas que cuentan con luz eléctrica; en los rangos medio, bajo y muy bajo se tienen ocho, seis y tres municipios respectivamente (tabla VII).

**TABLA VII**  
Estado de México: mortalidad infantil y viviendas particulares habitadas que cuentan con luz eléctrica 2010 (número de municipios)

VPH LUZ	TMI					Total
	Muy Alta	Alta	Media Alta	Media Baja	Baja	
Muy Alto de 87.7 a 100	7	1	3	4	10	25
Alto de 75.2 a 87.7	5	5	4	15	26	55
Medio de 68.9 a 75.1	1	2	1	3	8	15
Bajo de 43.9 a 68.8	3	1	4	5	6	19
Muy Bajo de 0.0 a 43.8	0	0	4	4	3	11
Total	16	9	16	31	53	125
%	12.8	7.2	12.8	24.8	42.4	100

Fuente: Elaborado sobre la base del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS, 2010) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010).

**TASAS DE MORTALIDAD INFANTIL Y VIVIENDAS PARTICULARES HABITADAS QUE CUENTAN CON DRENAJE, 2010**

En el Estado de México para el año 2010 se contó con 3,749,106 viviendas particulares habitadas, de las cuales el

92.62% cuentan con drenaje. Este indicador refleja las condiciones que rodean a una familia y a los menores de un año que favorece o no la salud humana (figura 9).

La correlación de Pearson y las viviendas con agua potable no es significativa, la cual es de 0.11.

Los rangos muy alto y alto de viviendas particulares habitadas que cuentan con drenaje concentran 53 y 28 municipios respectivamente (64.8% del total); en el rango medio se tienen 14 municipios; y en los rangos bajo y muy bajo albergan 24 y 6 municipios (19% y 4.8% del total, respectivamente).

Esta situación refleja que casi dos terceras partes de viviendas particulares habitadas cuentan con drenaje y esto implica condiciones favorables para la salud humana incluyendo los menores de un año. Caso contrario aproximadamente una quinta parte de viviendas tienen rango bajo que cuentan con drenaje; y por último casi el 5% se encuentra en el rango muy bajo.

Las TMI muy altas se registran en 16 municipios (12.8% del total) de las cuales la mitad están en el rango muy alto de viviendas particulares habitadas que cuentan con drenaje; en los rangos alto y bajo se localizan tres municipios respectivamente; y en el rango medio dos municipios.

Las TMI altas se presentan en nueve municipios (7.2%), de los cuales la mayoría están en los rangos muy alto y alto con cuatro y tres municipios respectivamente; y en el rango bajo únicamente dos.

Las TMI media altas se registran en 16 municipios (12.8%), de los cuales en los rangos muy alto y alto se tienen cuatro y dos municipios respectivamente; en el rango medio hay dos; en los rangos bajo y muy bajo se tienen seis y dos municipios correspondientemente. Dicha situación refleja que las TMI media altas se presentan en todos los rangos de viviendas particulares habitadas que cuentan con drenaje.

Las TMI media bajas se presentan en 31 municipios (24.8% del total), de los cuales 13 y nueve tienen rango muy alto y alto de viviendas particulares habitadas que cuentan con drenaje; dos tienen rango medio; seis y un municipio están en los rangos bajo y muy bajo respectivamente. Esta situación indica que la mayoría de los municipios tiene condiciones favorables para la salud humana, en términos de servicios a la vivienda, en específico el drenaje.

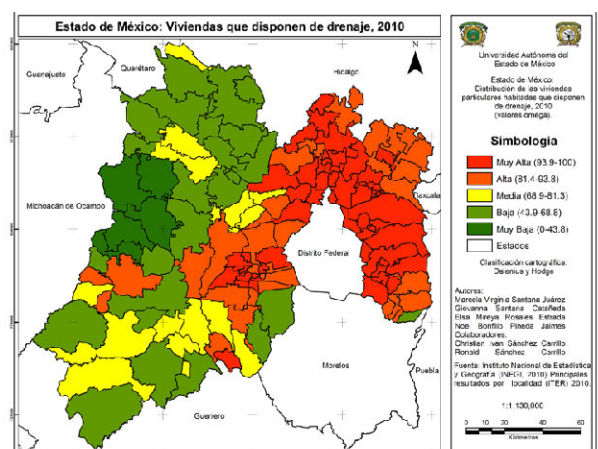


Figura 9. Estado de México. Viviendas que disponen de drenaje, 2010

**TABLA VIII**

Estado de México: mortalidad infantil y viviendas particulares habitadas que cuentan con drenaje 2010 (número de municipios)

VPH DRENAJE	TMI					Total
	Muy Alta	Alta	Media Alta	Media Baja	Baja	
Muy Alto de 93.9 a 100	8	4	4	13	24	53
Alto de 81.4 a 93.8	3	3	2	9	11	28
Medio de 68.9 a 81.3	2	0	2	2	8	14
Bajo de 43.9 a 68.8	3	2	6	6	7	24
Muy Bajo de 0 a 43.8	0	0	2	1	3	6
Total	16	9	16	31	53	125
%	12.8	7.2	12.8	24.8	42.4	100

Fuente: Elaborado sobre la base del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS, 2010) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010).

Las TMI bajas se presentan en 53 municipios (42.4%), de los cuales la mayoría de ellos están en los rangos muy alto y alto de viviendas particulares habitadas que cuentan con drenaje, con 24 y 11 municipios respectivamente, en el rango medio se tiene ocho municipios; en los rangos bajo y muy bajo existen siete y tres respectivamente. Situación favorable para la salud humana (tabla VIII).

**TASAS DE MORTALIDAD INFANTIL Y VIVIENDAS PARTICULARES HABITADAS QUE CUENTAN CON AGUA POTABLE, 2010**

En el Estado de México para el año 2010 se contó con 3,749,106 viviendas particulares habitadas, de las cuales el 90.25% cuentan con agua potable. Este indicador refleja las condiciones que rodean a una familia y a los menores de un año que favorece o no la salud humana (figura 10).

La correlación de las tasas de mortalidad infantil y las viviendas con drenaje no es significativa, es de 0.04.

Los rangos muy alto y alto de viviendas particulares habitadas que cuentan con agua potable concentran 22 y 56 municipios respectivamente (62.4% del total); en el rango medio se tienen 27 municipios (21.6%); y en los rangos bajo y muy bajo con 10 municipios respectivamente (16% del total). Esta situación refleja condiciones favorables para la salud y es importante también priorizar la cuarta parte de viviendas que requieren mejores condiciones con respecto a agua potable.

Las TMI en el rango muy alto se presentan en 16 municipios (12.8% del total), de los cuales tres están en el rango muy alto de viviendas particulares habitadas que cuentan con agua potable; y siete en el rango alto. En condiciones medias se tienen tres municipios. Únicamente dos y uno en los rangos bajo y muy bajo respectivamente.

Las TMI altas se presentan en nueve municipios (7.2%), de los cuales siete presentan rango alto de viviendas particulares habitadas que cuentan con agua potable; en los rangos medio y bajo se tiene un municipio respectivamente.

Las TMI en el rango medio alto se presentan en 16 municipios (12.8%), de los cuales la mayoría se concentran en el rango alto de viviendas particulares habitadas que cuentan con agua potable, que son seis municipios; en el rango muy alto se tienen tres municipios; en el rango medio también son tres; por último en los rangos bajo y muy bajo se tienen tres y uno respectivamente.

Las TMI del rango medio bajo se presentan en 31 municipios (24.8%), de los cuales 17 están en el rango alto de viviendas

particulares habitadas que cuentan con agua potable; muy alto en tres municipios; en el rango medio ocho; y en los rangos bajo y muy bajo se tienen uno y dos respectivamente.

Las TMI bajas se registran en 53 municipios (42.4%), de los cuales se concentran en los rangos muy alto, alto y medio de viviendas que disponen de agua potable en 13, 19 y 12 municipios principalmente. En los rangos bajo y muy bajo únicamente tres y seis municipios en cada rango, tabla IX.

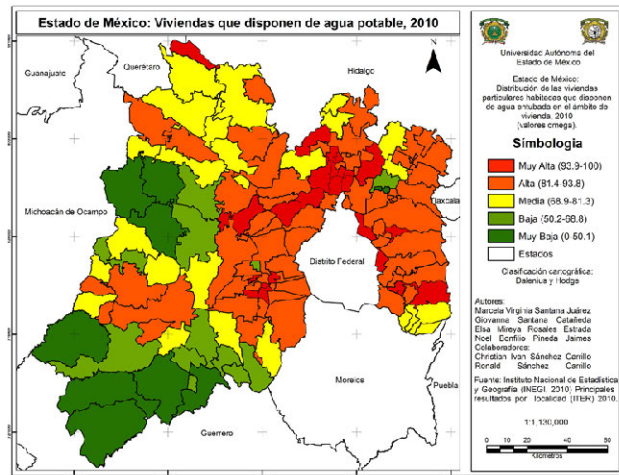


Figura 10. Estado de México. Viviendas que disponen de agua potable, 2010

**TABLA IX.**

Estado de México: mortalidad infantil y viviendas particulares habitadas que cuentan con agua potable, 2010 (número de municipios)

VPH AGUA	TMI					Total
	Muy Alta	Alta	Media Alta	Media Baja	Baja	
Muy Alto (93.9 a 100)	3	0	3	3	13	22
Alto (81.4 a 93.8)	7	7	6	17	19	56
Medio (68.9 a 81.3)	3	1	3	8	12	27
Bajo (50.2 a 68.8)	2	1	3	1	3	10
Muy Bajo (0 a 50.1)	1	0	1	2	6	10
Total	16	9	16	31	53	125
%	12.8	7.2	12.8	24.8	42.4	100

Fuente: Elaborado sobre la base del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS, 2010) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010).

**ANÁLISIS BIVARIADO DE LAS TASAS DE MORTALIDAD INFANTIL Y VIVIENDAS PARTICULARES HABITADAS QUE CUENTAN CON LUZ ELÉCTRICA, DRENAJE Y AGUA POTABLE, 2010**

A continuación se muestra la distribución de las TMI con la distribución de los servicios a la vivienda por cuadrantes:

El cuadrante I indica valores altos en las tasas de mortalidad infantil a pesar de que cuentan con valores altos en porcentajes de viviendas particulares habitadas que cuentan con luz eléctrica, drenaje y agua potable. Dicha situación indica condiciones favorables de los servicios a la vivienda que pueden incidir en la mortalidad infantil. En este caso representan aproximadamente el 20% de los municipios, que se localizan de manera dispersa principalmente en las Zonas Metropolitanas del Valle de México y Toluca (tabla X).



El cuadrante II, indica valores bajos en las TMI y altos en porcentajes de servicios a la vivienda (44% aproximadamente), situación que indica una situación favorable en la salud de la población infantil; localizados principalmente en municipios eminentemente urbanos y algunos al poniente del estado.

El cuadrante III, muestra que a pesar de registrar TMI bajas, existen bajos porcentajes que van de 22% a 24% de servicios básicos a la vivienda; ubicados principalmente al poniente y en algunos municipios urbanos.

Con relación al cuadrante IV, indica altas TMI y bajos porcentajes de servicios a la vivienda, situación que agrava la salud infantil que se presenta entre el 12 y 13% del total de municipios, localizados principalmente al poniente del estado y al centro sur (figuras 11, 12, 13, 14, 15 y 16).

**TABLA X**

Estado de México: Análisis bivariado de mortalidad infantil y servicios a la vivienda, 2010

CUADRANTE	TVPH LUZ ELÉCTRICA		TVPH AGUA POTABLE		TVPH DRENAJE	
	No.	%	No.	%	No.	%
I Alto - Alto	25	20	26	20.8	24	19.2
II Bajo - Alto	54	43.2	55	44	56	44.8
III Bajo - Bajo	30	24	29	23.2	28	22.4
IV Alto Bajo	16	12.8	15	12	17	13.6
Total de Municipios	125	100	125	100	125	100

Fuente: Elaborado sobre la base del Sistema Nacional de Información en Salud (SINAIS, 2010) e Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2010).

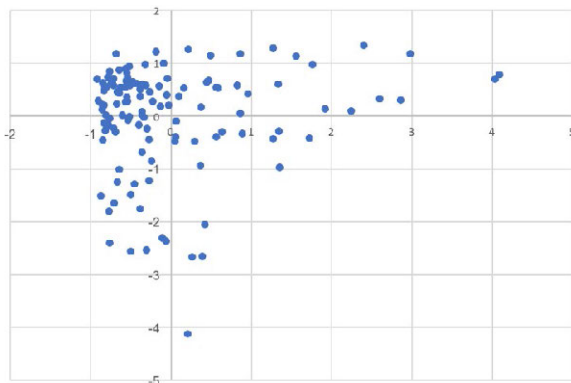


Figura 11. Estado de México: Análisis bivariado de la tasa de mortalidad infantil con el porcentaje de viviendas con luz eléctrica

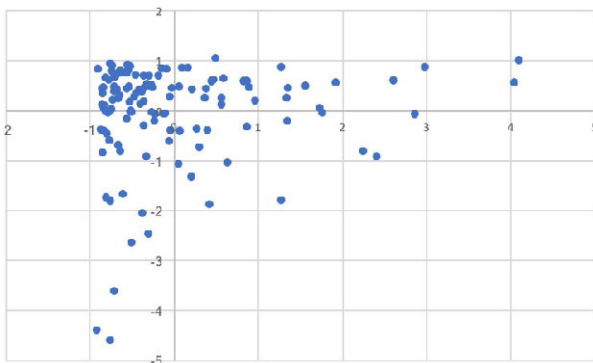


Figura 12. Estado de México: Análisis bivariado de la tasa de mortalidad infantil con el porcentaje de viviendas con agua potable

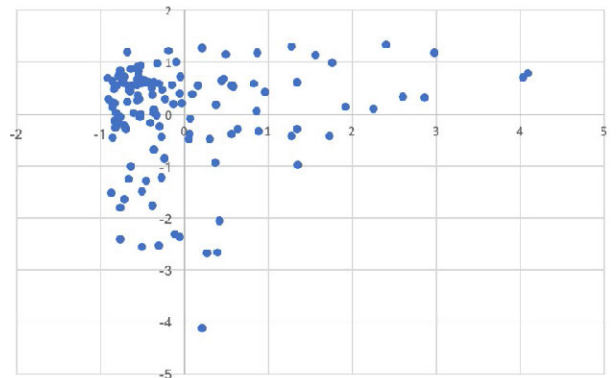


Figura 13. Estado de México: Análisis bivariado de la tasa de mortalidad infantil con el porcentaje de viviendas con drenaje

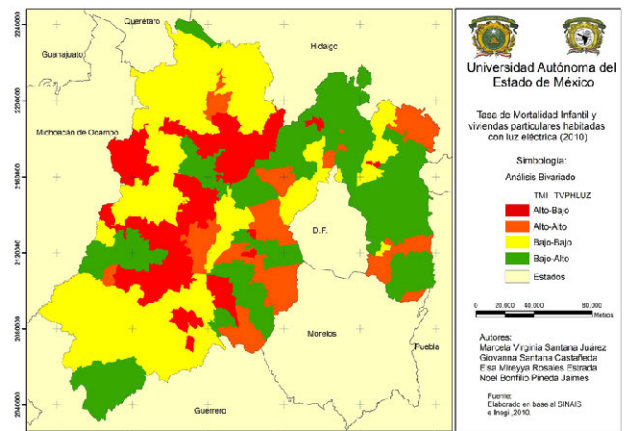


Figura 14. Estado de México: distribución de la tasa de mortalidad infantil con el porcentaje de viviendas con luz eléctrica (2010)

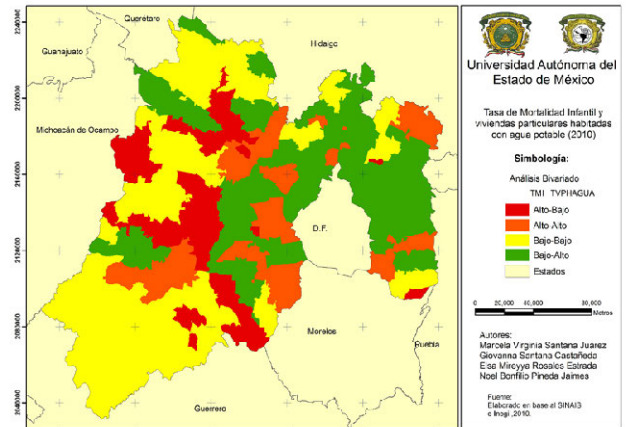


Figura 15. Estado de México: distribución de la tasa de mortalidad infantil con el porcentaje de viviendas con agua potable (2010)

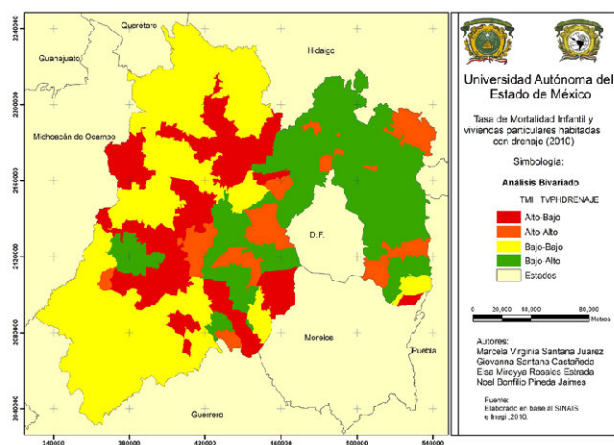


Figura 16. Estado de México: distribución de la tasa de mortalidad infantil con el porcentaje de viviendas con drenaje (2010)

### III. CONCLUSIONES

En relación a los resultados en este trabajo con respecto al Atlas de mortalidad infantil del Estado de México, como insumo para el ordenamiento territorial (Santana M., et.al. 2010), se señala que el atlas analiza la distribución de la mortalidad infantil en un estudio longitudinal, en el que se muestran los cambios en las reducciones de las TMI y los cambios en las causas durante el siglo XX. El presente trabajo es un estudio transversal porque únicamente considera el año 2010 y la relación con algunas características socioeconómicas, como una actualización del atlas.

El objetivo de este trabajo es conocer la distribución territorial de la mortalidad infantil, presentando como principal aporte el contar con un panorama sobre los niveles de este indicador, además de conocer la distribución de las características socioeconómicas y la relación entre ambos.

Considerando como referencia la tasa de mortalidad del Estado de México que es de 16.12 por mil nacidos vivos, la cual es superior a la nacional que es de 14.1, al interior del Estado de México en la mayor parte de los municipios se registran tasas superiores a la estatal.

Los resultados muestran que en el Estado de México las características socioeconómicas y de la mortalidad infantil no son homogéneas a nivel municipal. A nivel estatal se ha observado una disminución importante en las tasas de mortalidad infantil sin embargo el descenso no ha sido igual en los municipios.

Para el año 2010 se encontró que el 58% de los municipios presentan tasas de mortalidad infantil superiores a la estatal. El 20% de municipios registran TMI altas y muy altas; el 37.6%

se presentan en las condiciones medias y el 42.4% las TMI son Bajas.

Las correlaciones de Pearson no son significativas con las características socioeconómicas consideradas en este trabajo, por lo que muestra que la distribución de las TMI se presenta tanto en ámbitos urbanos como los rurales, con grados de marginación altos y bajos y con viviendas con servicios básicos y con bajos porcentajes de servicios. A este respecto se sugiere considerar variables principalmente sobre la alimentación y características geográficas locales y socioeconómicas de la mamá a fin de abordar la mortalidad materna infantil.

Uno de los inconvenientes es la escala de análisis territorial que es a nivel municipal, porque la TMI estatal o municipal no refleja las condiciones locales o a detalle de este importante indicador del desarrollo de la población.

Las tasas de mortalidad infantil muy altas se registran principalmente en el clima templado subhúmedo; en municipios con muy alto porcentaje de localidades rurales; con grado de marginación bajo y medio; y con población no derechohabiente alto y bajo.

Las tasas de mortalidad infantil altas se registran principalmente en el clima templado subhúmedo, en municipios con rango muy alto y medio de porcentaje de localidades rurales; con grado de marginación medio, bajo y muy bajo; y con población no derechohabiente bajo y alto principalmente.

La tasa de mortalidad infantil media alta se presenta principalmente en el clima templado subhúmedo, en municipios con muy alto porcentaje de localidades rurales, con grado de marginación medio y bajo porcentaje de población no derechohabiente.

La tasa de mortalidad infantil media baja se registra principalmente en municipios con clima predominante templado subhúmedo y seco, con muy alto porcentaje de localidades rurales, así como en el rango medio; con grado de marginación bajo y muy bajo, con población no derechohabiente alto y en el rango medio.

La tasa de mortalidad infantil baja se registra en municipios con clima predominante templado subhúmedo y en menor proporción en el seco; con muy alto porcentaje de localidades rurales, así como en el rango medio; con grado de marginación muy bajo, bajo y medio; con bajo, muy alto y alto porcentaje de población no derechohabiente.

Se sugiere realizar una matriz FODA para determinar las oportunidades y las amenazas, las fortalezas y las debilidades de la distribución de la mortalidad infantil y evaluar el avance en las políticas en materia de salud infantil, en términos de mortalidad infantil, para la ordenación territorial de los servicios públicos de salud y para la planeación de la salud infantil.

## AGRADECIMIENTOS

Se agradece el apoyo y la confianza del Consejo Nacional de Ciencias y Tecnología (CONACYT) por financiar el proyecto de investigación del observatorio geográfico de salud y riesgos en México.

Un merecido agradecimiento a nuestras autoridades de la Facultad de Geografía, UAEM: al Mtro. Francisco Zepeda Mondragón, al Mtro. Arturo Barreto Estrada y al Lic. Rubén Ochoa Mora por el apoyo brindado para el buen desarrollo de este proyecto de investigación.

Agradecemos el valioso apoyo de los becarios y tesistas: Christian Ivan Sánchez Carrillo, Ronald Sánchez Carrillo y al Lic. Jesús Emilio Hernández Bernal.

## REFERENCIAS

- Buzai G. (2015). Análisis espacial en geografía de la salud. Lugar Editorial S.A. Argentina.
- Censo de población y vivienda, 2010 (INEGI). Disponible en [http://gaia.inegi.org.mx/scince2/documentos/scince/metodo\\_notaTecnica.pdf](http://gaia.inegi.org.mx/scince2/documentos/scince/metodo_notaTecnica.pdf)
- Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. Indicadores de acceso y uso efectivo de los servicios de salud de afiliados al seguro popular, (CONEVAL, 2014), [en línea]. Consultada el 26 de octubre de 2016, disponible en internet: <http://www.coneval.org.mx/Informes/Evaluacion/Impacto/Acceso%20y%20Uso%20Efectivo.pdf>
- Dalenius, T. and Hodges, J. L. (1959) Minimum variance stratification. *Journal of the American Statistical Association*, 54, 88-101. Citado en Nota técnica, Estratificación univariada.
- Diertelen, P. (2015). Justicia distributiva y salud. Ciudad de México: Fondo de cultura económica y Universidad Nacional Autónoma de México.
- Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia (UNICEF, 2010). Recuperado el 19 de diciembre del 2016. Disponible en: [http://www.paho.org/uru/index.php?option=com\\_content&view=article&id=605:la-mortalidad-infantil-redujo-mas-mitad-diez-anos-persisten-disparidades-entre-paises-americas&Itemid=340](http://www.paho.org/uru/index.php?option=com_content&view=article&id=605:la-mortalidad-infantil-redujo-mas-mitad-diez-anos-persisten-disparidades-entre-paises-americas&Itemid=340)
- Garrocho, C. (1995). Análisis socioespacial de los servicios de salud, accesibilidad, utilización y calidad. El Colegio Mexiquense A. C. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2015. Dirección General de Información en Salud (DGIS). Base de datos de defunciones y Base de datos de nacidos vivos registrados 1990 - 2013, [en línea]. <http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/basesdedatos/nacidosvivos.html> Consultado el 17 de agosto de 2015
- Olivera, A. (1993). Geografía de la salud. Editorial Síntesis. Madrid, España.
- Organización Mundial de Salud (OMS, 2010) Boletín de la Organización Mundial de la Salud, UNICEF, OMS Recuperado 5 de Noviembre del 2016 en [http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2011/child\\_mortality\\_estimates\\_20110915/es/](http://www.who.int/mediacentre/news/releases/2011/child_mortality_estimates_20110915/es/)
- Organización Mundial de Salud (OMS, 2010) La biblioteca de Salud Reproductiva de la OMS, Enfriamiento para recién nacidos con encefalopatía hipóxico-isquémica, Recuperado 5 de Noviembre del 2016 en [http://apps.who.int/rhl/newborn/cd003311\\_ballotde\\_com/es/](http://apps.who.int/rhl/newborn/cd003311_ballotde_com/es/)
- Organización Mundial de Salud (OMS). Los Objetivos de Desarrollo del Milenio de las Naciones Unidas son ocho objetivos que los 191 Estados Miembros de las Naciones Unidas convinieron en tratar de alcanzar para 2015.
- OPS [http://www1.paho.org/hq/dmdocuments/2009/Agenda\\_Salud\\_para\\_las\\_Americas\\_2008-2017.pdf](http://www1.paho.org/hq/dmdocuments/2009/Agenda_Salud_para_las_Americas_2008-2017.pdf)
- Riera, J. (1985), La topografía médica vallisoletana de Pascual Pastor y López. Secretariado de publicaciones. Universidad de Valladolid, España.
- Santana M., et.al. (2010). Atlas de mortalidad infantil del Estado de México, como insumo para el ordenamiento territorial. *Revista Posgrados de la Universidad Nacional Autónoma de Honduras (UNAH)*. No. 4, Vol. II, Dic. 2010-
- Santana Juárez, M. V., Santana Castañeda, G., Rosales Estrada, E. M., Pineda Jaimés, N. B., Serrano Barquín, R. A., Sánchez Carrillo, C. I., & Sánchez Carrillo, R. (2017). Observatorio de Geografía de la salud del Estado de México. Mortalidad infantil. Toluca: UAEMex.
- Sorre, Max (1955), Fundamentos biológicos de la Geografía humana. Editorial Juventud. Barcelona, España.
- Urteaga, L. (1980), "Miseria, miasmas y microbios. Las topografías médicas y el estudio del medio ambiente en el siglo XIX", en Cuadernos Críticos de Geografía Humana Geocrítica. Año V. Número 29. Universidad de Barcelona. España.
- Who.int. (2016). OMS | Cambio climático y salud humana. [online] Available at: <http://www.who.int/globalchange/climate/es/> [Accessed 16 Nov. 2016].
- Clicom-mex.cicese.mx. (2017). CLICOM. [online] Available at: <http://clicom-mex.cicese.mx> [Accessed 7 Sep 2016].
- Dgis.salud.gob.mx. (2016). SALUD EN NÚMEROS. [online] Available at: [http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/sinai/s\\_index.html](http://www.dgis.salud.gob.mx/contenidos/sinai/s_index.html) [Accessed 21 Feb. 2016].
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2016). [online] [inegi.org.mx](http://inegi.org.mx). Available at: <http://www.inegi.org.mx/> [Accessed 21 Nov. 2016]



# Estudio comparado del efecto del ascenso del nivel del mar (ANM) sobre la infraestructura de salud y la población en las ciudades de Puerto Rico y del Caribe

José Seguinot Barbosa

Departamento de Salud Ambiental  
Recinto de Ciencias Médicas  
Universidad de Puerto Rico  
jose.seguinot@upr.edu

## RESUMEN

El propósito central de este estudio es presentar los datos comparativos del efecto del ascenso (ANM) del nivel del mar sobre las ciudades de Puerto Rico y del Caribe. Mediante el uso de los Sistemas de Información Geográfica y utilizando la base de datos provista por Google Earth se identificó la infraestructura asociada a los servicios de salud (hospitales, escuelas, hoteles y edificios públicos, entre otros) que podría estar afectada por el incremento de uno y cinco metros del ANM. Para determinar las áreas afectadas por el ANM se utilizó la base geográfica provista por la NASA en flood.firetree.net. Se usó el ArcGIS 10.3.3 para sobreponer y georeferenciar los polígonos de las zonas afectadas con la infraestructura identificada en cada ciudad. Utilizando la función de selección por localización se determinó entonces la infraestructura que se encontraba dentro de los polígonos de uno y cinco metros del ANM. Los cálculos de la población afectada se llevaron a cabo utilizando el censo más reciente (2014) para cada ciudad. En los casos donde había datos disponibles a nivel de tramo censal, como fue el caso de Puerto Rico, se sobrepuso el tramo con los polígonos de las áreas afectadas. En aquellas ciudades donde sólo existía el dato de la población general se estimó el porcentaje de área afectada y con este dato se estimó la cantidad de población en riesgo. Este estudio estableció a corto plazo (1 metro en 100 años) y largo plazo (5 metros en 500 años) la vulnerabilidad de la infraestructura y la población al ascenso del nivel del mar. Según el análisis San Juan y Cartagena de Indias son las ciudades del Caribe con mayor infraestructura y población en riesgo tanto para uno como para cinco metros. A nivel de Puerto Rico San Juan y Mayagüez son las ciudades que presentan una mayor vulnerabilidad.

Palabras Clave: **ascenso del nivel del mar, sistemas de información geográfica, ciudades del Caribe, infraestructura de salud, población.**

## INTRODUCCIÓN

Este proyecto surge como parte de una extensión de otro proyecto desarrollado bajo la propuesta del programa ULTRA (Urban long Term Research Area) y auspiciada por la National Science Foundation (NSF) y el United States Forest Service (USFS) titulada en inglés: San Juan, Puerto Rico: Social-Ecological System Change, Vulnerability, and the Future of a Tropical City. Esta propuesta abordó dos tipos de preguntas fundamentales en la investigación socio-ambiental. El primer grupo de preguntas planteó: ¿Cómo los factores biofísicos, económicos e institucionales afectan la vulnerabilidad natural y humana dentro del sistema urbano?, ¿Cómo éstos han cambiado espacial y temporalmente durante los últimos setenta años? y ¿En qué medida estos factores de vulnerabilidad han influenciado en la sostenibilidad de la ciudad?

El objetivo central del primer estudio realizado en San Juan fue el de medir la vulnerabilidad de las comunidades al cambio climático y al ANM (Seguinot, 2012). Para ello definimos las personas vulnerables como aquellas que por distintos motivos se sentían susceptibles a una situación de peligro. Respecto a la infraestructura esta puede considerarse vulnerable si se encuentra ubicada en lugares donde los efectos del ANM, serán sensibles.

La región de estudio comprende toda la cuenca del Caribe (figura 1). El énfasis está puesto en las ciudades costeras del Caribe, incluyéndose cuando menos varias ciudades capitales o importantes desde el punto de vista turístico o portuario para la región. Las ciudades estudiadas incluyen San Juan (Puerto Rico), Santo Domingo (República Dominicana), Habana (Cuba), Kingston (Jamaica), Cartagena de Indias (Colombia), Ciudad de Panamá (Panamá), Puerto Limón (Costa Rica), Punta Arenas (Costa Rica), Ciudad de Belice (Belice), Cancún (México) y Nassau (Bahamas). En el caso de Puerto Rico las ciudades estudiadas (figura 2) incluyen al menos una ciudad por cada región geográfica de la isla y las que usualmente se consideran las cabeceras urbanas de su municipio por lo cual llevan el mismo nombre que este último. Las ciudades bajo estudio son: San Juan (capital, región norte), Río Grande-Fajardo (región noreste y este), Ponce (región sur), Mayagüez (región oeste) y Aguadilla (región noroeste).



Figura 1: Puerto Rico en el Caribe y mapa de los límites políticos, 2016

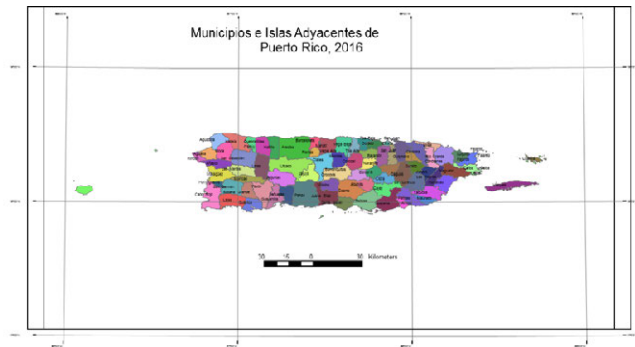


Figura 2: Municipios e islas de Puerto Rico, 2016

## METODOLOGÍA

A través de la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica y utilizando la base de datos provista por Google Earth se identificaron las estructuras asociadas a los servicios de salud (hospitales, escuelas, hoteles y edificios públicos, entre otros) que podrían ser afectadas por el incremento de uno y cinco metros del ANM. Para determinar las áreas afectadas por el ANM se utilizó la base geográfica provista por la NASA en flood.firetree.net. Esta base se proyectó con la aplicación del ArcGIS 10.3.3 para sobreponer y georreferenciar los polígonos de las zonas afectadas con la infraestructura identificada en cada ciudad. Utilizando la función de selección por localización se determinó entonces la infraestructura que se encontraba dentro de los polígonos de uno y cinco metros del ANM.

Una vez acesada la página web de la NASA se seleccionó la vista aérea de cada ciudad, preferiblemente a una escala entre 1:5000 a 1:10000 dependiendo de la extensión urbana de la ciudad. En esta página web se escogió la opción sobre a cuántos metros sería el ascenso del nivel del mar que se quería ver el despliegue, para esta investigación se seleccionaron uno y cinco metros como ANM. Esta imagen fue utilizada como base para digitalizar a mano todas las áreas (polígonos) afectadas en la ciudad por las penetraciones del mar a uno y cinco metros. Cada una de estas imágenes fue guardada para luego ser levantadas y georreferenciadas en el ArcGIS.

En el Programa de Google Earth se levantó la imagen correspondiente a cada ciudad en una escala similar a la levantada en la base de datos de la NASA. En esa imagen se marcaron cada uno de los puntos correspondientes a la infraestructura de hospitales, centros de salud, escuelas, hoteles, centros para el manejo de emergencias, estaciones de policías y bomberos, entre otros. Se construyó una tabla de toda la infraestructura afectada según las siguientes categorías: estructuras educativas, estructuras de servicios a la salud, áreas culturales y centros turísticos, áreas portuarias y aeropuertos, áreas recreativas, manejo de emergencias, estructuras importantes, iglesias y cementerios y otros (restaurantes, bares, áreas residenciales). Estos puntos fueron exportados al ArcGIS en formato KML convirtiéndose en una capa de información con formato Shapefile.

Para poder sobreponer la capa de puntos con la imagen de la NASA se proyectó la capa de puntos en un mapa mundial que incluía un mapa digital de cada país con un sistema de coordenadas WGS 1984. En este mapa también se georreferenció la imagen digital de cada ciudad que incluía los polígonos del ANM a uno y cinco metros. De esta manera se logró la so-

brexposición de los puntos (infraestructura) con los polígonos (ANM 1 y 5 metros). Una vez levantados todos los datos en una misma plataforma se utilizó el comando de selección por localización (Selection- by location) del ArcGIS para identificar todas las estructuras que caían dentro de los polígonos de uno y cinco metros. Las estructuras seleccionadas se convirtieron en una capa de información para efecto de identificarlas y contabilizarlas. Así fue como se construyeron las tablas que incluyen cada infraestructura afectada en cada ciudad.

Los cálculos de la población afectada para uno y cinco metros del ANM se llevaron a cabo utilizando el censo más reciente (2014) para cada ciudad, excepto Cancún que se usaron datos del 2008. En los casos donde había datos disponibles a nivel de tramo censal, como fue el caso de Puerto Rico, se superpuso el tramo con los polígonos de las áreas afectadas. En aquellas ciudades donde solo existía el dato de la población general se estimó el porcentaje del área afectada y con este dato se estimó la cantidad de población en riesgo. En algunos casos como en Santo Domingo la población existía para cada uno de los sectores urbanos de planificación. Se trató de conseguir un estimado de población oficial, es decir hecho por una institución autorizada por cada país. No obstante, en ocasiones dependimos de datos secundarios ofrecidos por fuentes secundarias como el Internet pero, éstos fueron

corroborados por otros medios. La fuente de los datos y/o la página web de donde se consiguieron los datos de población generalmente aparecen citadas en el capítulo correspondiente a cada ciudad.

Una vez conseguida toda la información necesaria se prepararon tablas síntesis (tablas 1 al 4) que resumen estadísticamente la cantidad de infraestructura afectada según cada una de las categorías estudiadas y la cantidad de población en riesgo en cada ciudad. Las tablas se hicieron por ciudades del Caribe y ciudades de Puerto Rico según el ANM de uno y cinco metros. Con estas tablas se prepararon las gráficas comparativas (ver resultados) entre todas las ciudades del Caribe y entre las ciudades de Puerto Rico. Se trató de completar la mayor cantidad de datos posibles para cada tabla, no obstante en algunos casos fue necesario incluir un NA (no aplica) para demostrar que para ese caso en particular no había información disponible. En los casos en que se incluyó un 0 fue porque no se logró identificar ninguna estructura que estuviera afectada. Para ver en detalle el efecto del ANM, tanto a uno como a cinco metros, en la infraestructura y en la población de las ciudades de Puerto Rico y el Caribe véase las tablas que se presentan a continuación.

**TABLA 1.**

Síntesis de las estructuras y población afectadas por el ANM de 1m en las ciudades del Caribe.\*

CATEGORÍA	SAN JUAN	SANTO DOMINGO	HABANA	KINGSTON	CARTAGENA DE INDIAS	CIUDAD DE PANAMÁ	PUERTO LIMÓN	PUNTA-RENAS	CIUDAD DE BELICE	CANCÚN	NASSAU
Educación	1	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0
Servicios de salud	2	0	0	0	1	0	0	0	6	0	2
Centros culturales y turísticos	8	2	1	NA	6	2	NA	3	4	4	10
Áreas portuarias y aeropuertos	6	3	NA	3	3	2	1	2	1	1	2
Áreas recreativas	6	NA	NA	NA	NA	NA	1	NA	NA	1	2
Manejo de emergencias	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1
Estructuras importantes	2	NA	NA	1	3	5	1	NA	NA	NA	0
Iglesias y cementerios	5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	1	NA	1
Transportación/ Sistema vial	NA	2	2	NA	42	NA	1	1	NA	NA	NA
Otros	NA	NA	NA	NA	NA	1	NA	NA	NA	NA	NA
Total Est	30	7	3	1	55	10	4	6	20	6	19
Población	66,300	29,760	4,096	5,860	57,727	5,415	4,513	1,203	4,267	32,512	4,240

**TABLA 2.**

Síntesis de las estructuras y población afectadas por el ANM de 5m en las ciudades del Caribe.\*

CATEGORÍA	SAN JUAN	SANTO DOMINGO	HABANA	KINGSTON	CARTAGENA DE INDIAS	CIUDAD DE PANAMÁ	PUERTO LIMÓN	PUNTA-RENAS	CIUDAD DE BELICE	CANCÚN	NASSAU
Educación	14	0	0	5	13	9	2	1	19	0	1
Servicios de salud	13	0	1	2	9	3	0	0	14	0	2
Centros culturales y turísticos	40	7	19	6	39	10	3	3	10	16	2
Áreas portuarias y aeropuertos	15	3	NA	11	7	4	1	2	1	2	1
Áreas recreativas	23	1	12	3	19	8	1	NA	NA	5	1
Manejo de emergencias	6	NA	NA	4	1	NA	1	NA	NA	NA	1
Estructuras importantes	20	NA	5	19	6	15	3	NA	NA	1	6
Iglesias y cementerios	13	1	7	NA	5	6	1	NA	2	NA	1
Transportación/ Sistema vial	2	3	3	2	254	NA	5	1	NA	NA	NA
Otros	4	1	NA	7	5	5	1	1	NA	3	NA
Total Est.	150	16	47	59	358	60	18	8	46	27	15
Población	312,337	58,240	24,449	205,103	215,450	13,538	64,477	2,156	60,963	78,029	31,800

\*Datos del Censo tomados al año 2014, excepto Cancún que los datos bases son del 2008.

**TABLA 3.**

Síntesis de las estructuras y población afectadas por el ANM de 1m en las ciudades de Puerto Rico. \*

CATEGORÍA	SAN JUAN	RIO GRANDE-FAJARDO	PONCE	MAYA-GÜEZ	AGUA-DILLA
Educación	1	0	0	2	1
Servicios de salud	2	0	0	0	0
Áreas culturales y centros turísticos	8	15	3	NA	1
Áreas portuarias y aeropuertos	6	NA	4	1	NA
Áreas recreativas	6	6	1	7	NA
Manejo de emergencias	NA	NA	NA	NA	NA
Estructuras importantes	2	NA	NA	NA	NA
Iglesias y cementerios	5	NA	NA	NA	NA
Transportación/Sistema vial	NA	2	NA	NA	NA
Otros	NA	6	3	7	3
Total Est.	30	29	11	17	6
Población	66,300	20,413	8397	3,385	1816

**TABLA 4**

Síntesis de las estructuras y población afectadas por el ANM de 5m en las ciudades de Puerto Rico\*\*

CATEGORÍA	SAN JUAN	RIO GRANDE-FAJARDO	PONCE	MAYA-GÜEZ	AGUA-DILLA
Educación	14	0	3	12	4
Servicios de salud	13	0	0	3	0
Áreas culturales y centros turísticos	40	15	4	1	5
Áreas portuarias y aeropuertos	15	NA	5	2	NA
Áreas recreativas	23	NA	2	19	NA
Manejo de emergencias	6	NA	1	2	NA
Estructuras importantes	20	NA	1	15	NA
Iglesias y cementerios	13	NA	2	8	NA
Transportación/sistema vial	2	NA	NA	NA	NA
Otros	4	6	2	16	6
Total Est.	150	21	20	78	15
Población	312,337	38,861	19,826	26,816	3,018

\*\*Datos Censales: Tomados del Census Explorer, Proyecciones a 2013-14

**Resultados**

De acuerdo a los análisis realizados encontramos que San Juan y Cartagena de Indias son las ciudades del Caribe con mayor infraestructura y población en riesgo tanto para uno como para cinco metros. En Puerto Rico San Juan y Mayagüez son las ciudades que presentan mayor vulnerabilidad. No obstante, estos resultados hay que mirarlos según cada una de las categorías de análisis que hemos construido. Estas son: estructuras educativas, estructuras de servicios a la salud, áreas culturales y centros turísticos, áreas portuarias y aeropuertos, áreas recreativas, manejo de emergencias, estructuras importantes, iglesias y cementerios y otros (restaurantes, bares, áreas residenciales).

**CIUDADES DEL CARIBE**

A nivel del total de la infraestructura impactada por el ANM de un metro (figura 3) las ciudades Caribeñas que sufrirán un mayor impacto en su infraestructura pública son: Cartagena de Indias y San Juan, seguidas de Ciudad de Belice y Nassau.

Las ciudades que menos impacto tendrán son: Kingston, Habana y Puerto Limón.



Figura 3: Estructuras afectadas por el ANM de 1m

Las ciudades caribeñas (figura 4) cuya infraestructura será más afectada por un incremento del ANM de 5 metros son en orden descendente: Cartagena de Indias y San Juan. En comparación con el efecto de 1 metro en cinco metros se observa un descenso en Ciudad Belice y Nassau, mientras se observa un pequeño incremento en la Habana y Ciudad de Panamá. La ciudades con menos infraestructura afectada son: Puntarenas, Nassau y Santo Domingo.

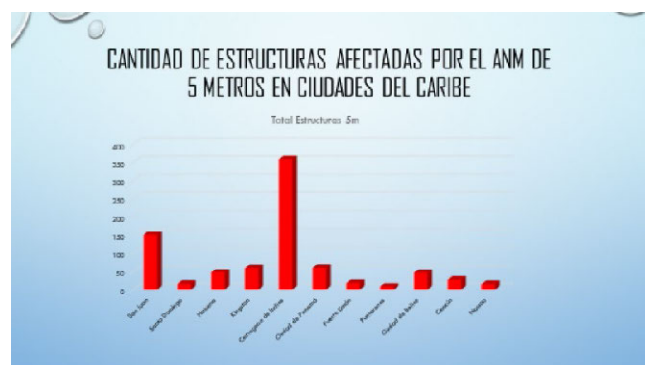


Figura 4: Estructuras afectadas por el ANM de 5m.

Las ciudades con infraestructura educativa más afectada en cinco metros de ANM pueden verse en la figura 5. La ciudad que perderá mayor cantidad de estructuras educativas (escuelas, colegios, universidades) con este ANM serán: Ciudad de Belice y San Juan. Las ciudades menos afectadas serán: Santo Domingo, Cancún y la Habana.



Figura 5: Estructuras educativas afectadas por el ANM de 5m

Las ciudades caribeñas (figura 6) cuya infraestructura de salud será más afectada por un incremento del ANM de 5 metros son en orden descendente: Ciudad de Belice y San Juan.



La ciudades cuyos servicios de salud no se verán muy afectados Santo Domingo, Punta Arenas y Puerto Limón en Costa Rica y Cancún, México.



Figura 6: Estructuras de salud afectadas por el ANM de 5 Metros

Respecto a la población afectada es importante señalar que aunque aquí se están comparando ciudades muy grandes con ciudades más pequeñas lo que es relevante es la cantidad de personas que están en riesgo de ser afectados por el ANM. Como sabemos la población no está distribuida homogéneamente y ciudades grandes como Kingston tienen poca población cercana a la costa, mientras ciudades medianas como Cancún tienen mucha población costera. Las ciudades con mayor población (figura 7) en riesgo por el ANM de un metro son en orden descendente: San Juan, Cartagena de Indias, Cancún y Santo Domingo. Las ciudades estudiadas con menor cantidad de población en riesgo son: Punta Arenas, Habana, Nassau y Ciudad de Panamá.



Figura 7: Población afectada por el ANM de 1m

Las ciudades con mayor población (Figura 8) en riesgo ante un ANM de 5 metros son: San Juan, Cartagena de Indias y Kingston. Las ciudades caribeñas con menor cantidad de población en riesgo para este ANM son: Punta Arenas, Ciudad de Panamá y la Habana.

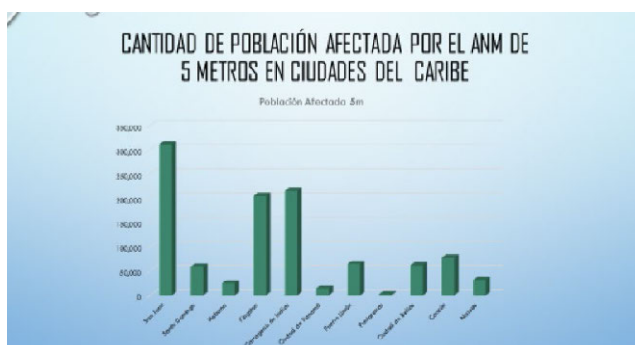


Figura 8: Población afectada por el ANM de 5m

CIUDADES DE PUERTO RICO

El total de la infraestructura impactada por el ANM de un metro (figura 9) las ciudades de Puerto Rico que sufrirán un mayor impacto en su infraestructura pública son: San Juan y Rio Grande- Fajardo. Las ciudades que menos impacto tendrán son: Aguadilla y Ponce.

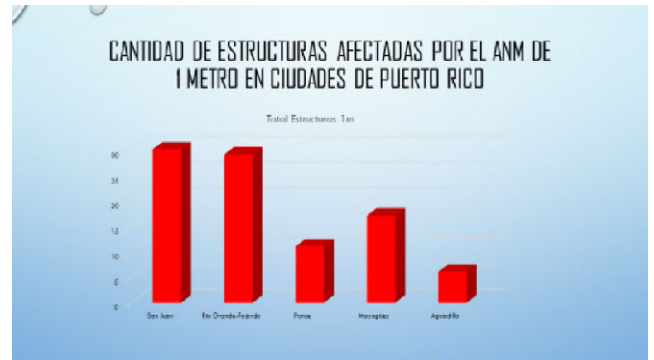


Figura 9: Estructuras afectadas en ciudades de Puerto Rico por el ANM de 1m

Las ciudades de Puerto Rico (figura 10) cuya infraestructura será más afectada por un incremento del ANM de 5 metros son en orden descendente: San Juan y Mayagüez. Las menos impactadas por este ascenso los son Aguadilla y Ponce.

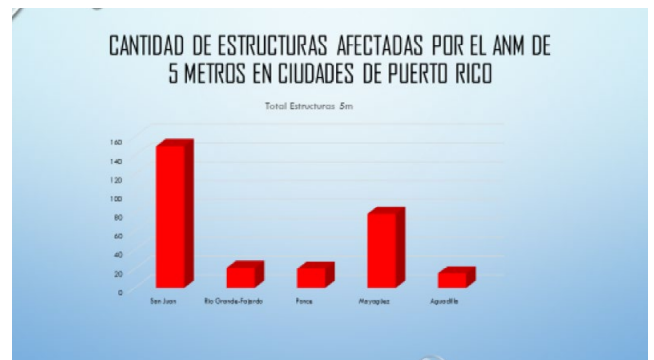


Figura 10: Estructuras afectadas en ciudades de Puerto Rico por el ANM de 5 metros

Las ciudades puertorriqueñas con la infraestructura educativa más afectada en cinco metros de ANM pueden verse en la figura 11. Las ciudades que perderán mayor cantidad de estructuras educativas (escuelas, colegios, universidades) con este ANM serán: San Juan y Mayagüez. Las ciudades menos afectadas serán: Rio Grande-Fajardo y Ponce.



Figura 11: Estructuras educativas afectadas en ciudades de Puerto Rico por el ANM de 5 metros

Las ciudades de Puerto Rico (figura 12) cuya infraestructura de salud será más afectada por un incremento del ANM de 5 metros son en orden descendente: San Juan y Mayagüez. Las ciudades cuyos servicios de salud no se verán muy afectados son: Río Grande-Fajardo, Ponce y Aguadilla.



Figura 12: Estructuras de salud afectadas en ciudades de Puerto Rico por el ANM de 5m

Las ciudades con mayor población (figura 13) en riesgo por el ANM de un metro son en orden descendente: San Juan y Río Grande-Fajardo. Las menos afectadas son: Aguadilla y Mayagüez.



Figura 13: Población afectada en ciudades de Puerto Rico por el ANM de 1m

Las ciudades de Puerto Rico con mayor población (figura 14) en riesgo ante un ANM de 5 metros son: San Juan y Río Grande-Fajardo. Las ciudades con menor cantidad de población en riesgo para este ANM son: Aguadilla y Ponce.



Figura 14: Población afectada en ciudades de Puerto Rico por el ANM de 5 metros

## CONCLUSIONES

Luego de realizado este estudio llegamos a las siguientes conclusiones específicas: Las ciudades caribeñas con un mayor índice de vulnerabilidad al ANM son: Cartagena de Indias en Colombia y San Juan de Puerto Rico. Las ciudades con un menor índice de vulnerabilidad al ANM son: Punta Arenas, Santo Domingo y Ciudad de Panamá. En Puerto Rico las ciudades más vulnerables son San Juan y Mayagüez y las menos vulnerables son Aguadilla y Ponce. Es importante señalar que todas las ciudades estudiadas son en mayor o menor medida vulnerables a los efectos del ANM. No obstante, si las comparamos entre ellas siempre habrá unas más vulnerables que otras.

De acuerdo a la infraestructura impactada por el ANM de un metro las ciudades caribeñas que sufrirán un mayor impacto en su infraestructura pública son: Cartagena de Indias y San Juan. Las ciudades caribeñas cuya infraestructura será más afectada por un incremento del ANM de 5 metros son en orden descendente: Cartagena de Indias y San Juan. Las ciudades con infraestructura educativa más afectada en cinco metros de ANM serán: Ciudad de Belice y San Juan. Las ciudades caribeñas cuya infraestructura de salud será más afectada por un incremento del ANM de 5 metros son en orden descendente: Ciudad de Belice y San Juan. Las ciudades con mayor población en riesgo por el ANM de un metro son en orden descendente: San Juan, Cartagena de Indias y Cancún. Las ciudades con mayor población en riesgo ante un ANM de 5 metros son: San Juan, Cartagena de Indias y Kingston.

Las ciudades de Puerto Rico que sufrirán un mayor impacto en su infraestructura impactada por el ANM de un metro son: San Juan y Río Grande-Fajardo. Las ciudades de Puerto Rico cuya infraestructura será más afectada por un incremento del ANM de 5 metros son en orden descendente: San Juan y Mayagüez. Las ciudades que perderán mayor cantidad de estructuras educativas (escuelas, colegios, universidades) con un ANM de 5 metros serán: San Juan y Mayagüez. Las ciudades de Puerto Rico cuya infraestructura de salud será más afectada por un incremento del ANM de 5 metros son en orden descendente: San Juan y Mayagüez. Las ciudades con mayor población en riesgo por el ANM de un metro son en orden descendente: San Juan y Río Grande-Fajardo. Las ciudades boricuas con mayor población en riesgo ante un ANM de 5 metros son: San Juan y Río Grande-Fajardo.

Este estudio refleja que hay muchos factores que determinan el impacto que habrá de tener el ANM en las diferentes ciudades de Puerto Rico y El Caribe. Entre ellos se incluyen algunos elementos naturales como la topografía o la elevación en la cual se encuentra enclavada la ciudad, la cantidad de infraestructura y de población que se encuentra ubicada en el litoral y en la zona costera, la ubicación con respecto al polo norte donde se encuentra la ciudad (las ciudades que se ubican en la costa sur de las islas o del continente están menos expuestas) y los efectos locales de la tectónica de placas, pues algunas ciudades se están levantando junto a la placa donde están ubicadas mientras otras, por el contrario se están hundiendo. Dicho en palabras técnicas algunas ciudades representan costas de emersión mientras otras son costas de sumersión. Por supuesto, las ciudades o sus sectores que representan áreas de sumersión están siendo afectados con mayor intensidad por el ANM.

A modo de conclusión general podemos señalar que el estudio demuestra que no todas las ciudades de Puerto Rico y del Caribe son vulnerables con la misma intensidad a los efectos del ascenso del nivel del mar. Por lo tanto su nivel de vulne-

rabilidad real y su situación de peligro varía según su nivel de desarrollo socio-económico y las zonas donde se ha concentrado el mismo. Desafortunadamente en el Caribe la mayor parte de este desarrollo ha sido en las zonas costeras, razón por la cual ello incrementa la vulnerabilidad de las ciudades al ANM. Ello nos lleva a la conclusión de que el nivel de sos-

tenibilidad y de justicia ambiental existente en las ciudades del Caribe también varía espacialmente de acuerdo a los niveles de exposición a los riesgos marítimos y climáticos, así como a sus propias características demográficas, económicas y ambientales.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, C. A., Barton, E. D., and Mooers C. N. K. (2003). Evidence for an eastward flow along the Central and South American Caribbean Coast. *JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH*, 108(C6, 3185). doi:10.1029/2002JC001549
- Brown, Desmond. "Bahamas Will Lose 80% Of Land In This Century To Climate Change, Builds Sea Walls". *Informed Comment*. N.p., 2015. Web. 21 Nov. 2016.
- BURKE R. Y OTROS (2010): *Getting to Know ArcGIS*. California, Editorial ESRI Press, 604 pags.
- Cazenave, A.; Nerem, R. S. (2004). «Cambios actuales del nivel del mar: Observaciones y causas». *Rev. Geophys* 42: RG3001.
- Centro de Estudios Sociales y Demográficos (CESDEM) & ICF International (2014) *Encuesta Demográfica y de Salud 2013*. Santo Domingo, República Dominicana: CESDEM y ICF International.
- Consejo de Cambio Climático de Puerto Rico (CCCPR). (2013). *Estado del Clima de Puerto Rico 2010-2013, Resumen Ejecutivo: Evaluación de vulnerabilidad socio-ecológicas en un clima cambiante*. Recuperado de [http://pr-ccc.org/wp/content/uploads/2014/08/PRCCC\\_ExecutiveSummary.pdf](http://pr-ccc.org/wp/content/uploads/2014/08/PRCCC_ExecutiveSummary.pdf)
- FUNDACIÓN DE CIENCIAS (FNC y SFF), Propuesta. (2010): "San Juan, Puerto Rico: Social-Ecological System Change, Vulnerability, and the Future of a Tropical City", 45pags.
- Georgia Tech Logistics Innovation & Research Center de Panamá. (2016). *Estadísticas e información de Puertos*. Recuperado en: <http://logistics.gatech.pa/es/assets/seaports/balboa>
- <http://flood.firetree.net/>
- <http://www.census.gov/censusexplorer/censusexplorer.html>
- Lizano A, M., & Lizano R, O. (2011). *Creación de escenarios de inundación en la Ciudad de*
- LOUNSBURY, J.F. y ALDRICH, F.T. (1986): *Introduction to Field Methods and Techniques*. Columbus, Ed. Charles E. Merrill, 215 pags.
- MORENO, A. Y OTROS (2005): *Sistemas y análisis de la información geográfica. Manual de autoaprendizaje con ArcGIS*, Madrid, Editorial Ra-Ma., 895 pags.
- Municipio de Ponce . (2014). *Datos Relevantes sobre Ponce* . (J. Figueroa Santiago, Editor) Retrieved 13 de February de 2015 from Ponce Ciudad Señorial
- MUÑOZ-ERICKSON, T.A. AGUILAR-GONZALEZ, B.J. Y SISK, T.D. (2007): "Linking ecosystem health indicators and collaborative management: a systematic framework to evaluate ecological and social outcomes", *Ecology and Society* 12 (2): pp. 6-18
- Nakka, S. (2010). *Engineering response to global sea level rise - Case Study, Port of Kingston, Jamaica*. Stanford University.
- Pedrozo-Acuña, A., Damania, R., Laverde-Barajas, M. A., & Mira-Salama, D. (2015). *Assessing the consequences of sea-level rise in the coastal zone of Quintana Roo, México: the costs of inaction*. *Journal of Coastal Conservation*, 1-14.
- Puerto Rico Climate Change Council. (2010-2013). *Puerto Rico 's State of Climate: Assessing Puerto Rico's Social-Ecological Vulnerabilities in a Changing Climate* . San Juan : PRCCC.
- Puntarenas ante el aumento del nivel del mar. *InterSedes*, 11(21). Recuperado de <http://revistas.ucr.ac.cr/index.php/intersedes/article/view/1010>
- Salguero, M. A., Penón, M. L., & Li, S. A. (2006). *Estado del conocimiento del agua subterránea en Costa Rica*. *Boletín Geológico Y Minero*, 117(1), 63-73.
- Seguinot-Barbosa, J. (1996): "La ecología urbana de San Juan (una interpretación geográfico social)", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 16: pp. 161-184
- Seguinot-Barbosa, J. (1997): *San Juan, Puerto Rico: la ciudad al margen de la bahía*, Ed. Geo, San Juan, 142 pags.
- Seguinot- Barbosa J. (2012), *Vulnerabilidad de las Comunidades de San Juan, Puerto Rico al Cambio climático*. Recuperado de: <http://sanjuanultra.org/recurso/vulnerabilidad-de-las-comunidades-al-cambio-climatico/>
- SKIDMORE A. (2002): *Environmental modeling with GIS and Remote Sensing*. London, Ed. Taylor and Francis, 425 pags.
- UNESCO/COI ( 2010) *AUMENTO Y VARIABILIDAD DEL NIVEL DEL MAR - RESUMEN PARA RESPONSABLES DE POLÍTICAS*. Obtenido el 13 de febrero de 2016. Recuperado de <http://unesdoc.unesco.org/images/0018/001893/189369s.pdf>
- Vanzie, E. (2008, Noviembre). *Assessment of impact of Climate Change on Belize's Health Sector: Dengue and Dengue Hemorrhagic Fever*. [http://www.hydromet.gov.bz/downloads/Vulnerability\\_Adaptation\\_Assessment\\_Health.pdf](http://www.hydromet.gov.bz/downloads/Vulnerability_Adaptation_Assessment_Health.pdf)
- Whittle, D., & Muñoz-Núñez, D. *Sea Level Rise Policies in Cuba*. (2015). Retrieved December 11, 2015 from, <http://gulf-sealevel.org/Whittle,%20Dan.pdf>
- Yi, S., W. Sun, K. Haki, y A. Qian, (2015), *An increase in the rate of global mean sea level rise since 2010*. *Geophys. Res. Lett.*, doi:10.1002/2015GL063902.





# Infraestructura de datos espaciales



# Infraestructura de datos espaciales del sistema de información geológico ambiental minero (SIGAM) del servicio geológico y minero argentino (SEGEMAR)

Pedreira José Ángel<sup>1</sup>, Ferpozzi Federico<sup>2</sup>, Álvarez Saúl<sup>1</sup>, Candaosa Gabriel<sup>2</sup>, Chavez Silvia<sup>2</sup>, Avanzas Rubén<sup>1</sup>, Zappetini Eduardo<sup>2</sup>, García Pilar<sup>3</sup>, Marín Graciela<sup>2</sup>

1 Sociedad Asturiana de Diversificación Minera (SADIM)  
C/Jaime Alberti 2, 33900 Ciaño/Asurias/España  
jangel.pedreira@sadim.es

2 Instituto de Geología y Recursos Minerales (IGRM)/Servicio Geológico Minero de Argentina (SEGEMAR)  
Av/ General Paz 5445 - Parque Tecnológico Miguelete. Edificio 25 /Provincia de Buenos Aires/ Argentina  
graciela.marin@segemar.gov.ar

3 Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT)/Universidad de Oviedo  
Campus de Mieres. Edificio de Investigación. C/Gonzalo Gutiérrez Quirós s/n, 33600 /Mieres/España  
marquinez@uniovi.es

## RESUMEN

En el marco del Subprograma Gestión Ambiental Minera (GEAMIN) de la Secretaría de Minería, se ha desarrollado el Sistema de Información Geoambiental Minera (SIGAM) con el objetivo estratégico de contribuir a la modernización e implantación de nuevas capacidades en el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR). Uno de sus componentes es la Infraestructura de Datos Espaciales, que es el mecanismo utilizado para facilitar el acceso a la información geoambiental de base generada en el SEGEMAR, lo que permite a un usuario, utilizando un simple navegador, poder descubrir, utilizar esa información y combinarla según sus necesidades. Son objetivos del proyecto: implementar la IDE del SIGAM, que permita la publicación en la Web, de información cartográfica geológica ambiental y minera producida por el SEGEMAR, a través de Servicios estándar del OGC, basada en componentes de software libre; conseguir una integración del SIG institucional del SIGAM, basado en el software de ESRI ArcGIS, con los componentes de software libre utilizados para implementar esta IDE; separar completamente el entorno de producción cartográfica del SIGAM, del entorno de publicación de su IDE. Para el desarrollo de la IDE del SIGAM, y la publicación, de la información geoespacial generada desde el Sistema de producción cartográfica del SIGAM, se optó por la utilización de componentes de Software Libre, los cuales facilitan la escalabilidad de la solución, sin necesidad de invertir en costosas licencias, y con capacidad suficiente para publicar los servicios WMS, WFS y CSW definidos por el OGC.

Palabras clave: **Infraestructura de Datos Espaciales, GIS, Software Libre, Geología.**

## ABSTRACT

*Within the framework of the Mining Environmental Management Subprogram (GEAMIN) of the Mining Secretariat, the Geo-Environmental Mining Information System (SIGAM) has been developed with the strategic objective of contributing to the modernization and implementation of new capabilities in the Argentine Geological Mining Service (SEGEMAR). One of its components is the Spatial Data Infrastructure, which is the mechanism used to facilitate access to basic geo-environmental information generated in the SEGEMAR, which allows a user, using a simple browser, to discover, use that information and combine it according to its needs. The goals to achieve are: implement the SIGAM SDI, which allows the publication*

on the Web of environmental and mining geological cartographic information produced by SEGEMAR, through OGC standard services, based on opens source software components; achieve the SIGAM GIS integration, based on the ESRI ArcGIS software, with the free software components used to implement this SDI; completely separate the cartographic production environment of the SIGAM from the publishing environment of its SDI. For the development of the SIGAM SDI, and the publication, of the geospatial information generated from the SIGAM cartographic production system, Free Software components has been used, these eases the scalability of the solution, without the need to invest in costly licenses, and with sufficient capacity to publish the WMS, WFS and CSW services defined by the OGC.

**Keywords:** Spatial Data infrastructure, GIS, Open source software, Geology.

## I. INTRODUCCIÓN

Podemos definir una IDE como “un conjunto de datos espaciales, tecnología, normas y planes institucionales, todos ellos encaminados a facilitar la disponibilidad y el acceso a dichos datos espaciales”. (Luaces, M., Olaya ,V. & Fonts, O. (2014))

A diferencia de los planteamientos anteriores a la aparición de las IDE, en los que se consideraba a los datos como elementos independientes que podían jugar su papel en el entorno SIG sin necesidad de establecer políticas o acuerdos referidos a ellos, el desarrollo de las IDE trae consigo un nuevo planteamiento en el que los datos necesitan elementos adicionales para ser verdaderamente productivos. Una Infraestructura de Datos Espaciales es, por tanto, mucho más que datos. Una IDE incluye, además de los datos y atributos geográficos, metadatos (datos que describen la información geográfica), métodos que permitan descubrir, visualizar y valorar esos datos (catálogos y cartografía en red) y algún método para proporcionar acceso a los datos geográficos (normalmente, un GeoPortal, publicado en Internet es el medio habitual)

Dicho esto, estructuralmente una IDE se constituye en una red virtual, integrada de distintas partes o elementos, cuyos componentes principales son:

- **Datos geográficos:** Son aquellos datos espaciales que hacen referencia a una localización sobre la tierra (georeferenciados) y con los cuales se representan objetos del mundo real (Hidrografía, carreteras, uso del suelo, curvas de nivel, etc.).
- **Metadatos:** informan a los usuarios sobre las características descriptivas de los datos geográficos. Los metadatos van a describir la información cartográfica contestando a las siguientes preguntas:
  - ¿Qué describe el conjunto de datos?
  - ¿Quién ha producido el conjunto de datos?
  - ¿Qué finalidad tienen los datos?
  - ¿Cómo se creó el conjunto de datos?
  - ¿Cómo sería posible obtener una copia del conjunto de datos?
  - ¿Quién escribió los metadatos?
- **Servicios:** son funcionalidades asociadas a las capas de información que se ofrecen a través de la web, en función de estándares abiertos e interoperables con la finalidad de facilitar el acceso de los usuarios a todos los datos publicados. Entre los servicios más importantes que ofrece una IDE están: WMS (Web Map Service), WFS (Web Feature Service) y CSW (Catalogue Service Web).
- **Tecnología:** se refiere a la arquitectura informática que soporta la relación cliente-servidor, mediante la cual el

servidor procesa la petición de uno o varios clientes devolviendo una respuesta.

- **Normas y estándares:** son documentos de aplicación voluntaria que regulan y garantizan la interoperabilidad de la información geográfica, para que los datos puedan entenderse y transferirse a través de la web.
- **Acuerdos políticos:** permiten establecer acciones coordinadas entre instituciones, a través de un marco legal con efectos jurídicos y técnicos que sostengan la implementación de la IDE en todos los niveles del Estado. El apoyo político es fundamental para el correcto desarrollo de las IDE, ya que el mayor esfuerzo de captura y mantenimiento de información geográfica se realiza en el sector público.
- **Actores:** son organismos o entidades que juegan un rol dentro la IDE, entre los cuales están: los productores de datos, desarrolladores de software, intermediarios y usuarios.



Figura. 1. Componentes de una IDE

En el marco del Subprograma Gestión Ambiental Minera (GEAMIN) de la Secretaría de Minería, se ha desarrollado el Sistema de Información Geológica Ambiental Minera (SIGAM) con el objetivo estratégico de contribuir a la modernización e implantación de nuevas capacidades en el Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR).

El SIGAM, ha sido diseñado y desarrollado como una infraestructura de datos espaciales (IDE) y un SIG institucional para la gestión de datos e información geológico-ambientales, abar-



cando la incorporación, administración, evaluación, accesibilidad y disponibilidad vía “web” de la información existente.

El SIGAM además, contribuye a la solución de otra necesidad estratégica del Estado Nacional, la cual es la de facilitar el acceso y/o disponibilidad de la información geoambiental de base generada en el SEGEMAR, en tiempo y forma, para su utilización en el proceso de toma de decisiones, sea en lo referente a administración sustentable de los recursos y el ambiente, en gestión ambiental de la actividad minera y en planificación territorial, entre otros aspectos.

Por tanto, dentro de los objetivos del desarrollo de la IDE del SIGAM se encuentran:

- La publicación en Internet, de la información cartográfica geológica ambiental y minera producida por el SEGEMAR, a través de Servicios estándar del OGC
- Conseguir una integración entre el SIG del SIGAM, basado en el software de ESRI, y los componentes de software libre empleados para implementar su IDE.
- Separar completamente el entorno de producción cartográfica del SIGAM, del entorno de publicación de su IDE.

El SEGEMAR es un organismo científico-tecnológico del Estado Nacional que tiene como misión, generar datos e información geocientífica, geológica, minera y ambiental, necesarios para promover y contribuir al conocimiento y desarrollo de los recursos naturales no renovables y, en este marco, generar información sobre la condición natural de calidad de los recursos naturales, que contribuya a individualizar, prevenir y mitigar los impactos que pudieran ser identificados en relación con ellos.

## II. MÉTODO

Para cada uno de los componentes, de la IDE del SIGAM, se detalla a continuación, los pasos que se llevaron a cabo para su realización:

### A. ARQUITECTURA DE LA IDE DEL SIGAM

Para albergar los distintos componentes de la IDE, se definió durante la fase de Análisis y Diseño, la arquitectura física y lógica del entorno de publicación del SIGAM

La arquitectura física propuesta consiste en:

- Un clúster de 2 Servidores web balanceados, donde estarían instalados los siguientes productos en cada instancia:
  - Servidor Web Apache Tomcat,
  - Gestor de Contenidos Wordpress,
  - Software de Catálogo de Metadatos GeoNetwork,
  - Servidor de Mapas GeoServer.
- Un clúster de 2 Servidores de ficheros, utilizado para servir las peticiones de documentos al repositorio documental del GeoPortal
- Un clúster de 2 Servidores de Base de Datos PostgreSQL+PostGIS
- Un servidor SAN de almacenamiento.

En la siguiente figura se muestra un esquema de la arquitectura física de la IDE del SIGAM.

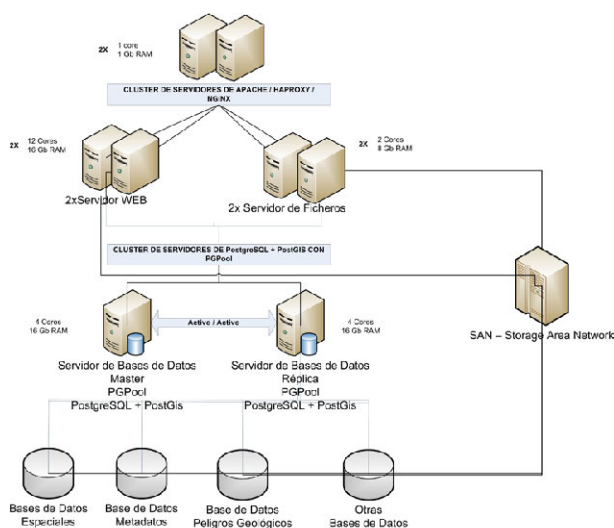


Figura. 2. Arquitectura física del entorno de publicación del SIGAM (entorno internet)

En la siguiente figura se muestra la arquitectura, con todos los componentes software y de datos del entorno de publicación del SIGAM:

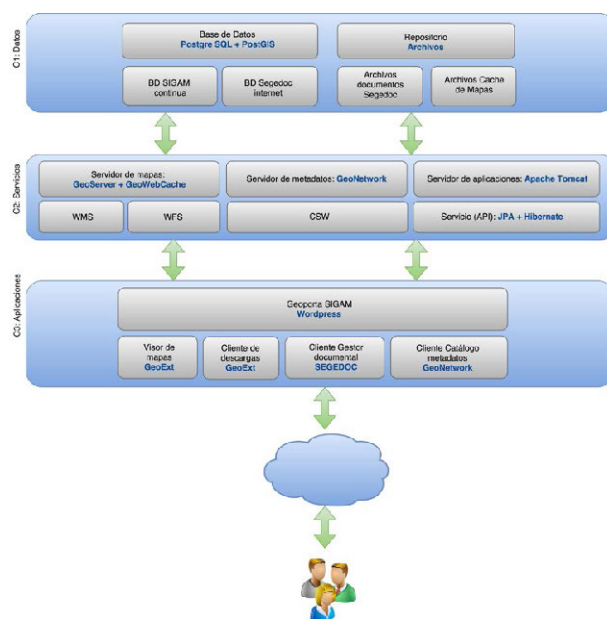


Figura. 3. Arquitectura lógica del entorno de publicación del SIGAM (entorno internet)

Este esquema de arquitectura lógica se estructura en tres capas que se detallan a continuación:

#### C1. Datos

En la capa de datos se encuentran por un lado las Bases de Datos en PostgreSQL+PostGIS, donde se almacenan las capas vectoriales sobre las que operan los Servicios WMS y WFS, y por otro el repositorio de archivos, que contiene los documentos del Gestor documental, y del cache en formato MBTiles utilizado por GeoServer.

#### C2. Servicios

En esta capa está GeoServer como servidor de mapas, GeoNetwork como Servidor del Catálogo de Metadatos y Apache Tomcat como servidor de aplicaciones.

Esta capa es la encargada de proporcionar los servicios OGC estándar, WMS, WFS y CSW.

### C3 Aplicaciones

En esta capa es donde se incluyen las aplicaciones accesibles desde el GeoPortal del SIGAM, como el Visualizador de Mapas, el cliente del catálogo de metadatos GeoNetwork, el cliente del Repositorio Documental y el propio GeoPortal.

#### B. GEOPORTAL DEL SIGAM

Para el desarrollo del GeoPortal, durante la fase de Análisis se identificaron, con los técnicos del SEGEMAR, los diferentes apartados que debería tener el sitio web, que permitieran publicar la información asociada al SIGAM, así como a los elementos de su IDE.

Como software CMS (Content Management Software), la consultora ofertó el software de código abierto Wordpress, un software muy maduro y ampliamente utilizado en el ámbito de los gestores de contenidos para la web, que ofrece entre otras cosas:

- Facilidad de uso.
- Licencia open-source gratuita.
- Múltiples plugins y módulos adicionales.
- Facilidades de posicionamiento SEO.
- Facilidad para la personalización.

Durante la fase de diseño, se optó por la utilización de la plantilla de Wordpress, Avada. El tema Avada, es una plantilla muy popular en el ámbito de Wordpress, con un coste muy reducido que encajaba con los requerimientos del GeoPortal del SIGAM, ofreciendo un conjunto de características, opciones y herramientas que lo hacen muy versátil permitiendo tomar el control de prácticamente todos los aspectos del sitio web y ofreciendo además, un diseño responsivo que facilita su visualización en todo tipo de ordenadores y dispositivos móviles.

Durante esta fase se llevaron a cabo varios prototipos del Geoportal, que se fueron refinando en sucesivas revisiones realizadas con los técnicos del SEGEMAR, hasta llegar al diseño definitivo.

Tras la implementación en WordPress de los contenidos del sitio web del Geoportal, y con el objetivo de que éste pudiera ser mantenido por los técnicos del SEGEMAR, se llevó a cabo una capacitación para la instalación, configuración y gestión de los contenidos del Geoportal, mediante la utilización de los productos WordPress y Avada.

#### C. VISOR DE MAPAS

Para el desarrollo del Visor de Mapas, se identificaron, junto con los técnicos del SEGEMAR, los requisitos funcionales y no funcionales del mismo durante la fase de Análisis, estableciéndose qué funcionalidades dispondría dicho Visor, plasmandose éstas en casos de uso según establece el lenguaje de modelado UML. Durante esta fase se identificaron las diferentes herramientas y elementos del visor, como la lista de capas, leyenda, mapa de situación, etc.

En la fase de Diseño del Visor se llevó a cabo el prototipado de la herramienta y se optó por la utilización del framework de desarrollo Boundless SDK proporcionado por el producto de Software Libre OpenGeo Suite 4.5, para la implementación de dicho Visor.

El framework Boundless SDK dispone de varias plantillas de desarrollo, en el caso del Visor de Mapas del SIGAM, se optó por la utilización de la plantilla GXP. Esta plantilla hace uso de GeoExt, que es una combinación de la interfaz de Ext JS (versión 3.4.0) con la tecnología de OpenLayers (versión 2.x).

Esta plantilla proporciona buena parte de la funcionalidad definida para el Visor, pudiendo personalizar aquella funcionalidad no contemplada mediante programación basada en javascript y apoyándose en la librería ExtJS y en la librería ampliamente utilizada en el ámbito de los Visualizadores cartográficos de Software Libre Open Layers.

Tras la fase de desarrollo, parametrización y personalización del Visor de Mapas, se llevó a cabo el plan de pruebas, para asegurar el buen funcionamiento del Visor y la correspondencia entre la herramienta desarrollada y lo definido en las fases de análisis y diseño del producto.

Con el fin de que los técnicos del SEGEMAR puedan incluir nueva funcionalidad en el futuro o realizar nuevas parametrizaciones y personalizaciones de la funcionalidad existente, además de la capacitación para la instalación y configuración del Visor, la consultora proporcionó también una capacitación, de personalización del Visor de Mapas, incluyendo la programación de nuevas herramientas dentro del mismo, configuración de fuentes de datos, grupos y capas de información a visualizar, etc.

#### D. SERVICIOS WMS Y WFS

Una vez finalizado el diseño del Modelo de Datos del SIGAM, y construida la GeoDatabase institucional, donde se irá almacenando toda la cartografía geológica y temática que produce el SEGEMAR, en formato continuo, se decide, junto con los técnicos del SEGEMAR, que Servicios WMS y WFS, y que capas de información dentro de cada uno de esos servicios se publicarán a través de la IDE del SIGAM.

Para realizar la publicación de los Servicios WMS y WFS, que ofrece la IDE, dentro del Servidor de Mapas GeoServer, se siguen los siguientes pasos:

- En el entorno de producción (Intranet)
  - Definir las vistas con los atributos a publicar y con los valores descriptivos asociados a los atributos de las Feature Class, dentro de la GeoDatabase de producción, con diccionarios asociados.
  - Elaborar dentro de ArcMap, los MXD de publicación, para cada uno de los servicios a publicar. Dentro de los MXD, se crearan los grupos, se incluirán las capas a publicar, y se definirá la simbología, escala y orden de visualización de cada una de ellas.
  - Una vez construido y guardado el documento de mapa MXD asociado a un Servicio, se publica en el ArcGIS Server de producción desde ArcMap haciendo uso de menú Archivo -> Compartir como -> Servicio.
  - Realizar la exportación de los datos vectoriales a publicar, a una GeoDatabase de archivo, para su posterior importación dentro de la Base de Datos PostgreSQL del entorno de publicación.
  - En el caso de los Servicios WMS:
    - Publicar en el Servidor de Mapas GeoServer, instalado en el entorno de producción, el nuevo Servicio a publicar como Servicio WMS cascade del Servicio WMS publicado en ArcGIS Server.
    - Utilizar la operación GenerateTiles del servicio WPS integrado en Geoserver, para obtener un volcado en formato raster de cada una de las capas del nuevo servicio a publicar, en formato MBTile.
    - Extraer el icono de leyenda de la capa de información, haciendo una llamada a la operación GetLegendGraphic del Servicio WMS publicado en ArcGIS Server.
- En el entorno de publicación (Internet)

- Copiar los archivos de la GeoDatabase de archivos y los ficheros MBTile, generados en el entorno de producción, al entorno de publicación.
- En el caso de los Servicios WMS:
  - Publicar las capas MBTile como servicio WMS dentro del GeoServer
  - Indicar desde el apartado de estilos de Geoserver que el icono de la capa es el que hemos obtenido previamente
- Importar en la base de datos PostgreSQL los datos vectoriales obtenidos en formato Geodatabase de Archivo de ESRI.
- Publicar las capa PostGIS según una norma de nombrado que nos permita asociarlas con las ráster publicadas anteriormente
- Modificar las plantillas de Geoserver para redireccionar las llamadas a la operación GetFeatureInfo de la capa ráster a la que corresponda en formato vectorial.

Con este procedimiento los servicios resultantes publicados en el entorno de publicación disponen de las siguientes características:

- No tiene limitaciones por la licencia del software.
- No tiene cuota de consumo, ni limitaciones por uso concurrente.
- No necesita acceder al entorno de intranet, con las ventajas de seguridad y privacidad que ello conlleva, al estar en dos entornos independientes y desconectados.

Para cada capa de información hay accesibles dos capas publicadas, una con el volcado ráster y otra con la copia de los datos vectoriales:

- La capa ráster:
  - Dispone de la misma simbología, representación y escalas que la publicada en el entorno de intranet, incluyendo el cuadro de leyenda
  - Responde a la operación WMS GetFeatureInfo, devolviendo los atributos vectoriales que corresponda
- La capa vectorial
  - Está disponible en formato vectorial, a través del protocolo WFS.
  - Admite filtros WMS y `cql_filter`, y permite modificar la simbología, utilizando distintos estilos disponibles o enviando los SLD en las llamadas a la operación GetMap

El formato MBTile, empleado para generar los tiles de la capa raster de los Servicios WMS, es una especificación para almacenamiento eficiente de millones de tiles en un fichero SQL Lite.

#### E. CATÁLOGO DE METADATOS Y SERVICIO CSW

El primer paso que se llevó a cabo, al abordar este componente de la IDE, fue decidir qué perfil de metadatos se utilizaría para describir las capas de información publicadas por el SIGAM. Para tomar esta decisión se siguieron las recomendaciones del IDERA (Infraestructura de Datos Espaciales de la República de Argentina), adoptando el perfil de metadatos de esta organización. Este perfil denominado PMIDERA, utiliza como base el estándar ISO 19115 y la aplicación técnica IS 19139, relativa a metadatos.

La consultora, propuso como software para la gestión y consulta de los metadatos, así como para la publicación de los mismos a través de un servicio CSW estándar del OGC, la herramienta de software libre GeoNetwork.

GeoNetwork es una aplicación de catálogo para gestionar los recursos con referencias espaciales. Proporciona funciones de edición de metadatos y búsqueda de gran alcance, así como un mapa web visualizador interactivo embebido. Actualmen-

te se utiliza en numerosas iniciativas de infraestructura de datos espaciales de todo el mundo.

Las características principales de este producto son:

- Acceso inmediato a la búsqueda de catálogos geoespaciales locales y distribuidos.
- Subida y descarga de datos, gráficos, documentos, archivos pdf y cualquier otro tipo de contenido.
- Un Visor web de mapas interactivo para combinar Servicios web de mapas procedentes de servidores distribuidos por todo el mundo
- Edición en línea de metadatos con un potente sistema de plantillas.
- Recolección programada y sincronización de metadatos entre catálogos distribuidos
- Soporte del perfil OGC CSW-2.0.2 ISO perfil y los protocolos OAI-PMH, Z39.50
- Control de acceso con gestión de grupos y de usuarios
- Interfaz de usuario multilingüe.

Una vez adoptado el perfil de metadatos a utilizar, el siguiente paso era incorporar ese perfil de metadatos al software GeoNetwork, para poder gestionar los metadatos, haciendo uso de ese perfil. Para esta tarea se utilizó el Instructivo de configuración de Perfiles de IDERA en Geonetwork 2.10.x, publicado por IDERA, a través de su página web [www.idera.gov.ar](http://www.idera.gov.ar), en el que se indica como registrar el perfil PMIDERA en GeoNetwork y convertirlo en el perfil por defecto para registrar los metadatos mediante este software.

Por último se llevó a cabo dentro del entorno de publicación del SIGAM, la configuración del servicio CSW, encargado de exponer los metadatos de las capas de información del SIGAM.

Para el cliente web de consulta del Catálogo de Metadatos, se realizó una personalización del cliente proporcionado por GeoNetwork, modificando los estilos para adaptarlos a la guía de estilo del GeoPortal, y realizando una integración de este cliente web con Visor de Mapas del GeoPortal, de manera, que desde la el listado de capas del Visor, se pudiera enlazar con la ficha de metadatos asociada a esa capa de información y desde esa ficha de metadatos poder mostrar la capa de información dentro del Visor de Mapas del SIGAM.

### **III. RESULTADOS**

El resultado final de todos los procesos desarrollados ha sido la constitución de la Infraestructura de Datos Espaciales del Sistema de Información Geológica Ambiental Minero (SIGAM) del Servicio Geológico Minero Argentino (SEGEMAR), compuesta por los siguientes elementos:

#### A. GEOPORTAL DEL SIGAM

Constituye el punto de acceso a la información que el SIGAM pone a disposición de los ciudadanos y del resto de organismos y administraciones, a través de Internet, incluida la IDE del SIGAM. Los principales apartados de este GeoPortal son los que se detallan a continuación:

- SIGAM. Contiene la presentación institucional del SIGAM.
- IDE. Infraestructura de Datos Espaciales, desde donde se accede al Visor de Mapas del SIGAM, al listado de Servicios WMS y WFS publicados por el SIGAM, y al cliente de consulta del Catálogo de Metadatos del SIGAM
- Mapas. Listado de mapas predefinidos disponibles, de las diferentes temáticas cartográficas producidas por el IGRM.

- Descargas. Acceso al repositorio documental del SIGAM, desde el cual, los usuarios pueden descargar documentos.
- Ayuda. Acceso a elementos de ayuda sobre el funcionamiento y utilización de los diferentes elementos del GeoPortal.

En la figura 4 se muestra una captura de pantalla de la página principal del GeoPortal.

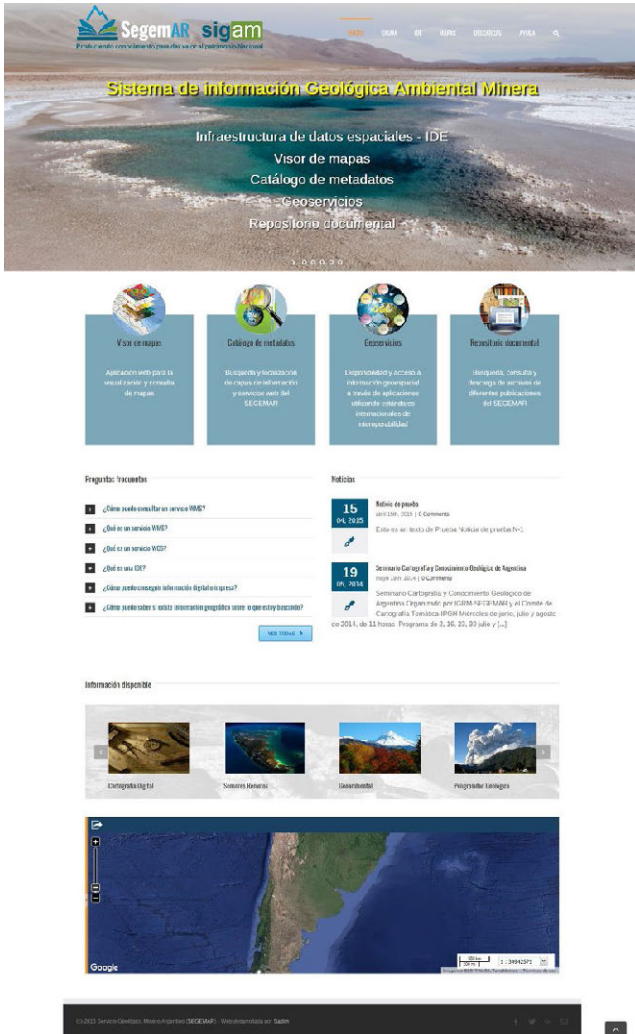


Figura 4. Aspecto de la página principal del GeoPortal del SIGAM

## B. VISOR DE MAPAS

El Visor de Mapas del SIGAM, constituye el elemento, que permite mostrar las capas de información cartográfica publicadas por el SIGAM a través de los servicios WMS proporcionados por su IDE, ofreciendo la posibilidad de integrar esta información con otras capas de información cartográfica proporcionadas por otros organismos o administraciones públicas.

Las principales funcionalidades que ofrece este Visor se enumeran a continuación:

- Herramientas de navegación por el mapa:
  - Acercar.
  - Alejar.
  - Zoom por área.
  - Ver extensión total.
- Herramientas de medida:
  - Medida de longitud.

- Medida de área.
- Herramientas de consulta:
  - Consulta de elementos haciendo uso de la operación GetFeatureInfo de los Servicios WMS.
  - Consulta de capa, que permite filtrar los elementos de una capa de un servicio WMS, con servicio WFS asociado, por la extensión de mapa actual y por atributos.
- Herramientas de búsqueda:
  - Búsqueda por localización, haciendo uso de los servicios de geolocalización que proporciona Google Maps.
- Herramientas de impresión:
  - Imprimir mapa.
- Herramientas de visualización:
  - Mostrar/ocultar el panel con el listado de capas y la leyenda de mapa.
  - Mostrar/ocultar mapa de referencia.
- Mapa de referencia.
- Listado de capas.
- Herramientas de gestión de capas:
  - Añadir capas, que permite añadir nuevas capas de información cartográfica a partir de Servicios WMS del SIGAM, o de cualquier otro Servicio WMS.
  - Limpiar capas.
  - Mapas predefinidos, listado de Mapas predefinidos, con una configuración de capas.
  - Guardar configuración de capas, haciendo uso del WMC (Web Map Context), que permite almacenar la selección de capas del mapa actual, para recuperarla posteriormente.
  - Integración con el Catálogo de Metadatos,
  - Desde el Visor de Mapas, y el listado de capas proporcionadas por el SIGAM, se puede acceder a los metadatos definidos para las mismas.
- Leyenda.

En la figura 5 se muestra una captura de pantalla del Visor de Mapas:

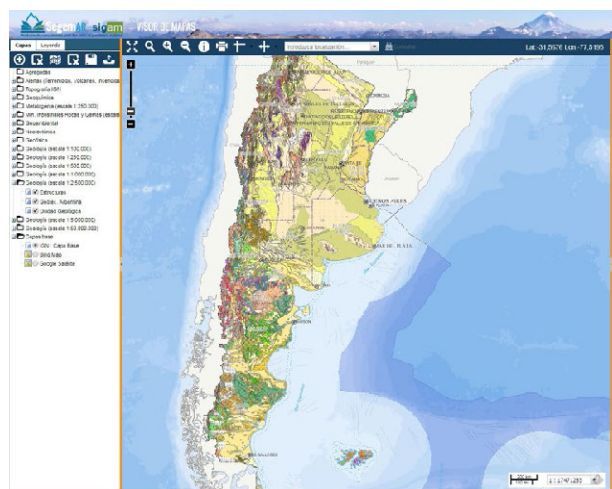


Figura 5. Detalle del Visor de Mapas del SIGAM

## C. SERVICIOS WMS Y WFS

Uno de los componentes más importantes de una IDE son los GeoServicios que publica. En el caso del SIGAM, se publican Servicios de Mapa WMS y Servicios de Entidad WFS.

La relación de Servicios WMS publicados a través de la IDE del SIGAM, se enumeran a continuación, agrupados por las diferentes direcciones del IGRM, encargadas de la producción de la información publicada por los diferentes servicios:

- Dirección de Geología Regional
  - WMS Mapa Geológico a escala 1:250.000.
    - Estructuras.
    - Unidades Geológicas.
    - Sitios de Interés Geológico.
  - WMS Mapa Geológico Frontera a escala 1:500.000.
    - Estructuras.
    - Unidades Geológicas.
  - WMS Mapa Geológico Provincia de Jujuy a escala 1:500.000.
    - Estructuras.
    - Unidades Geológicas.
  - WMS Mapa Geológico NOA proyecto MAPGAC a escala 1:1.000.000.
    - Estructuras.
    - Unidades Geológicas.
  - WMS Mapa Geológico a escala 1:2.500.000.
    - Estructuras.
    - Unidades Geológicas.
  - WMS Mapa Geotectónico de Sudamérica a escala 1:5.000.000.
    - Estructuras.
    - Unidades Geológicas.
  - WMS Neotectónica.
    - Deformaciones Cuaternarias.
- Dirección de Recursos Geológicos Mineros.
  - WMS Mapa Minerometalogenético a escala 1:250.000.
    - Unidades Tectonoestratigráficas.
    - Depósitos metalíferos.
    - Metalotectos.
    - Fajas Metalogenéticas.
    - Lineamientos y Anomalías magnéticas.
    - Anomalías Radimétricas.
    - Anomalías Geoquímicas.
    - Alteraciones Hidrotermales.
  - WMS Mapa de Minerales, Rocas y Gemas a escala 1:250.000.
    - Unidades Litoestratigráficas de Minerales industriales.
    - Depósitos no metalíferos.
  - WMS de Muestras geoquímicas
    - Muestras geoquímicas multielemento.
    - Muestras geoquímicas CPZ.
  - WMS de Geofísica.
    - Áreas de geofísica.
    - Líneas de vuelo.
- Dirección de Geología Ambiental Aplicada.
  - WMS Mapa de Unidades litológicas a escala 1:250.000.
    - Unidades Litológicas.
  - WMS Mapa Geomorfológico a escala 1:250.000.
    - Geomorfología.
  - WMS Mapa de Suelos a escala 1:250.000
    - Suelos.
  - WMS Mapa de SocioEconomía a escala 1:250.000.
    - Usos de Suelos.
    - Sociología Antropología Ejido.
  - WMS Mapa Susceptibilidad a escala 1:250.000.
    - Susceptibilidad Erosión.
    - Susceptibilidad Inundación.
    - Susceptibilidad Movimientos Masa.
    - Susceptibilidad Sedimentación.

- Susceptibilidad Vulcanismo.
- Susceptibilidad Sismicidad.
- Susceptibilidad Otros.
- WMS Fauna a escala 1:250.000.
  - Fauna Potencia.
- WMS Fauna a escala 1:250.000.
  - Unidades Fisonómicas.
- WMS Áreas Protegidas a escala 1:250.000.
  - Áreas Protegidas.
- WMS Pasivos Mineros a escala 1:250.000.
  - Pasivos Mineros.

En la figura 6, se muestra como se ve la información del Servicio WMS del Mapa Minerometalogenético a escala 1:250.000, con la misma simbología definida en ArcMap, incluidos los símbolos de la leyenda.

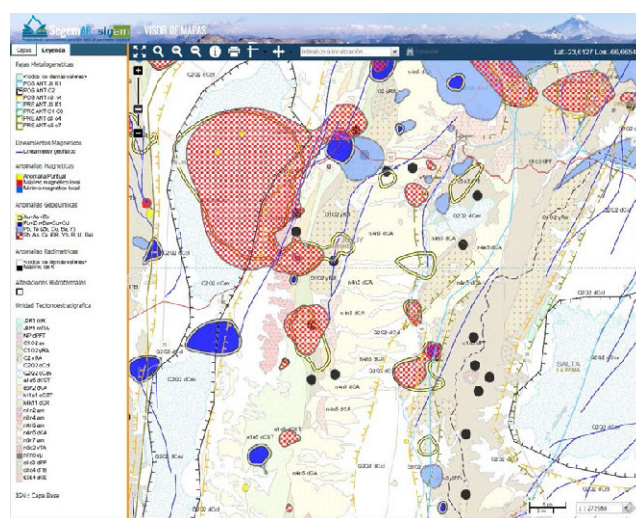


Figura 6. Ejemplo de servicio WMS del Mapa Minerometalogenético a escala 1:250.000 cargado en el Visor de Mapas

Actualmente sólo se ha publicado un Servicio WFS, del Mapa Geológico 2.500.000. Sin embargo desde el SEGEMAR se prevé ir aumentando el número de Servicios WFS publicados en la IDE del SIGAM, que permitan obtener la información vectorial y alfanumérica asociada a las capas de información cartográfica producidas por el IGRM.

#### D. CATÁLOGO DE METADATOS Y SERVICIO CSW

Otro de los componentes más importantes de una IDE son los metadatos, los cuales informan a los usuarios sobre las características descriptivas de los datos geográficos, (contenido, calidad, contacto, etc.) de cada capa de información publicada.

Para la consulta de estos metadatos, la IDE del SIGAM proporciona un Servicio de Catálogo de Metadatos CSW, y un cliente de consulta de ese Servicio CSW, basado en el producto de software libre GeoNetwork.

La aplicación cliente del Servicio de Catálogo, permite realizar búsquedas sobre los metadatos en relación:

- Al Qué, donde se puede indicar palabras clave por las que buscar, la organización o la escala de la información a buscar.
- Al Donde, permitiendo restringir la búsqueda a un área geográfica concreta.
- Al Cuando, indicando entre qué fechas de publicación, creación, etc., de las capas de información se quieren obtener resultados.



# Inventario de parques y jardines de la ciudad de Cuenca con UAV y smartphones

Pacheco Diego<sup>1</sup>, Ávila Luis<sup>2</sup>

1 Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE) Universidad del Azuay  
Av. 24 de mayo 7-77/Azuay/Ecuador  
dpacheco@uazuay.edu.ec

2 Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador (IERSE) Universidad del Azuay  
Av. 24 de mayo 7-77/Azuay/Ecuador  
luisavila@uazuay.edu.ec

## RESUMEN

La Universidad del Azuay en el año 2012 realiza un proceso de consultoría con EMAC-EP para el desarrollo de un sistema web para la gestión de parques, jardines y áreas verdes de la ciudad de Cuenca. El mismo tenía fines de cartografiar los elementos existentes en los parques y controlar las actividades de poda y mantenimiento de estas áreas. Como aporte de la Universidad del Azuay a este sistema se emprende la realización del inventario forestal de 8 parques. En el año 2017 se decide continuar el inventario para lo cual se actualiza la información (formulario) que se va a recolectar en el inventario y se apoya en los teléfonos inteligentes para el llenado del mismo. Para la producción de información cartográfica se usa el dron DJI Phantom 3 Pro para generar la información base que permita la digitalización de datos como es la ortofotografía y modelo digital de elevaciones (MDE). La información resultante además de ser visible en el sistema de gestión de parques y jardines estará disponible a través de protocolos estándar del Open Geospatial Consortium (OGC) como el Web Map Service (WMS) para su uso y distribución a través de internet. El formulario de inventario estará disponible al público en general con miras a desarrollar mecanismos participativos para que este inventario pueda ser realizado de forma abierta mientras que el componente cartográfico será responsabilidad de la Universidad del Azuay.

Palabras clave: **áreas verdes, dron, inventario forestal, teléfonos inteligentes, Web Map Service.**

## ABSTRACT

*The University of Azuay in 2012 conducts a consulting process with EMAC-EP for the development of a web system for the management of parks, gardens and green areas of the city of Cuenca. It had the purpose of mapping the existing elements in the parks and controlling the activities of pruning and maintenance of these areas. As contribution of the University of Azuay to this system is undertaken the realization of the forest inventory of eight parks. In 2017 it is decided to continue the inventory for which the information (form) to be collected in the inventory is updated and supported by smartphones to fill it. For the production of cartographic information, the DJI Phantom 3 Pro drone is used to generate the basic information that allows the digitization of data such as orthophotography and digital elevation model (DEM). The resulting information as well as being visible in the park and garden*

management system will be available through standard Open Geospatial Consortium (OGC) protocols such as the Web Map Service (WMS) for use and distribution over the internet. The inventory form will be available to the public with a view to developing participatory mechanisms so that this inventory can be done openly while the cartographic component will be the responsibility of the University of Azuay.

**Keywords:** drone, forest inventory, green areas, smartphones, web map service.

## I. INTRODUCCIÓN

Los parques urbanos han sido creados desde tiempos históricos con la finalidad de proporcionar diversos servicios destinados a beneficiar a determinados grupos sociales (Flores-Xolocotzi & De Jesús González-Guillén, 2007). El verde urbano, a más de desarrollar funciones de recreación y de bienestar psicofísico, produce efectos que ayudan a la eliminación del polvo y de contaminantes gaseosos, la reducción del ruido, enriquecimiento de la biodiversidad y la protección del suelo (INEC, 2010).

Es importante destacar los servicios ambientales que brindan los árboles a la ciudad y por ello la importancia de cuidarlos. Entre ellos tenemos: captura de carbono, regulación de la temperatura, provisión de agua en calidad y cantidad, generación de oxígeno, barrera contra ruidos, protección y recuperación de los suelos entre otros (Reyes & Gutiérrez, 2010). Sin embargo, la información sobre la vegetación urbana a detalle es rara o inexistente (Li et al., 2015). A nivel mundial existen iniciativas para realizar el inventario de árboles de forma participativa, una de ellas es TreesCount la cual convoca a un conjunto de voluntarios a recolectar la información de árboles. "TreesCount 2015-2016" reunió a más de 2.200 voluntarios que ayudaron a crear un inventario digital espacialmente preciso de los árboles de las calles de Nueva York ("TreesCount! 2015 : NYC Parks," n.d.). Otra iniciativa importante es Treepedia que funciona como un visor cartográfico del inventario de árboles mediante la posición geográfica de cada individuo y una fotografía al estilo Street View. En lugar de contar el número individual de árboles, desarrollan un método escalable y universalmente aplicable al analizar la cantidad de verde percibida mientras caminamos por la calle ("Treepedia :: MIT Senseable City Lab," n.d.).

Cuenca es una de las urbes de Ecuador con mayor déficit de zonas verdes, es decir, lugares de concentración masiva para actividades de recreación. En la ciudad, de acuerdo con datos de la Empresa Municipal de Aseo de Cuenca (EMAC-EP), existen alrededor de 208 parques. Los principales y los de mayor extensión son: El Paraíso, Parque de la Madre y el de Miraflores (El Tiempo, 2015; Vera, 2016).

Con el afán de brindar a la ciudadanía de Cuenca la oportunidad de conocer sus parques, y áreas verdes con las que cuenta, así como optimizar los procedimientos y metodologías a seguir por los técnicos y funcionarios para brindar mantenimiento y mejoramiento de las citadas áreas, la Empresa EMAC EP estableció una consultoría con la Universidad del Azuay en el año 2012 con el propósito de "Desarrollar un sistema de control y gestión de parques, jardines y áreas verdes administrados por la EMAC EP", mismo que podrá ser visto, revisado y seguido por parte de la ciudadanía, a través de internet.

En el sistema se encuentran inventariados 43 parques dentro del perímetro urbano entre infantiles, barriales, urbanos y lineales. Dentro del inventario de cada parque se reconoce elementos como áreas verdes, equipamientos y mobiliario además de la ubicación de los árboles de los cuales se cuenta con el inventario forestal de sólo 8 de ellos (Delgado, 2013).

El inventario forestal realizado en el año 2012 involucró levantamientos planimétricos para cartografiar los elementos del parque y el uso de formularios en papel para recolectar los datos que permitan evaluar la vigorosidad de cada árbol. Como muestra de los árboles cartografiados presentamos la figura 1 donde se puede apreciar su ubicación.



Figura 1. Árboles digitalizados en el parque de la Madre en el año 2012 para el sistema de Gestión de parques y jardines

El objetivo de este trabajo es mejorar la eficiencia de la realización de un inventario forestal con la generación de cartografía de los parques usando drones y automatizar la digitalización de la información de cada árbol a través de formularios que puedan ser administrados desde teléfonos inteligentes (smartphones) con sistema Android.

## II. MÉTODO

Para el inventario forestal se pretende generar la ortofotografía actualizada y el modelo digital de elevaciones (MDE) para que el equipo técnico pueda localizar cada uno de los elementos y evaluarlo. La metodología propuesta para el inventario forestal se puede apreciar en la figura 2.

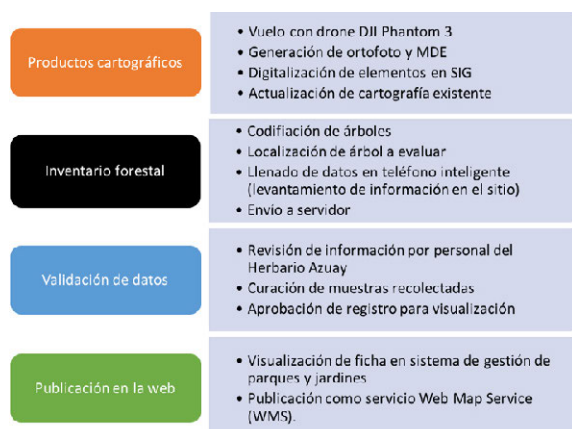


Figura 2. Esquema de trabajo para inventario forestal



## PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS

En el año 2015 el proyecto de la Universidad del Azuay denominado “Generación de información cartográfica a través de Vehículos aéreos no tripulados” permitió adquirir los conocimientos para el levantamiento de información cartográfica con estos equipos los cuales fueron aplicados en la toma de fotografía e imágenes aéreas de los parques de la ciudad de Cuenca concentrándose en espacios públicos.

Los Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT) o Unmanned Aerial Vehicle (UAV) más conocido con el término DRON son sistemas de vuelo sin piloto a bordo, con la capacidad de poder ser controlados desde tierra o volar en modo automático a partir de un plan de vuelo geo-referenciado por GPS. Tienen la capacidad de volar a baja altura y mantener una comunicación en tiempo real con la estación en tierra (Austin, 2011). Los drones son una alternativa eficiente para aplicaciones geomáticas de áreas pequeñas por el bajo costo de producción de información, alta temporalidad y resolución de datos espaciales (Uysal, Toprak, & Polat, 2015).

La generación de ortofotografías se realiza a través del dron DJI Phantom 3 Pro. Partimos de una programación del vuelo con el app Pix4D Capture tomando como parámetros iniciales el área a volar (parque), velocidad (Slow), altitud de vuelo (varía en cada parque) y traslapes longitudinales y transversales entre cada línea de vuelo (80%). Usando la ortofotografía de Sigtierras<sup>1</sup> se localiza puntos de control que permitan hacer la corrección de los desplazamientos (x,y,z) en el procesamiento de las fotografías con el software PhotoScan que generará como productos la ortofotografía, el MDE, la nube de puntos y el modelo 3D. Usando los SIG se procede con la digitalización de datos a partir de la ortofotografía con la finalidad de identificar las áreas verdes, equipamientos, mobiliario y ubicación de los árboles. En caso de ser un parque del que ya se cuente con información cartográfica se procederá a realizar la actualización del mismo.

## INVENTARIO FORESTAL

Los teléfonos inteligentes o smartphones pueden actuar como sensores pasivos que recogen, intercambian y procesan información de forma continua tanto en el espacio como en el tiempo (Ballari, Vilches, Perez, Pacheco, & Fernández, 2014). Con la aparición de estas tecnologías se crea una serie de software para la captación de los datos desde campo hacia sitios de almacenamiento, ahorrando así tiempo y recursos en la digitalización de datos. Uno de ellos es Open Data Kit (ODK) (Madriz, 2016). El formulario actualizado para el inventario forestal se migra a un ambiente móvil (figura 3) para facilitar el proceso de llenado y tener la posibilidad de integrar los sensores del teléfono inteligente como son el GPS y la cámara para adquirir datos adicionales.

Figura 3. Ejemplo de secciones de formulario de inventario forestal (valoración de copa y tronco) en un móvil con sistema Android.

## VALIDACIÓN DE DATOS

La información recolectada en campo será validada por el personal del Herbario de la Universidad del Azuay a través de la revisión de los datos en un formulario web que podrá ser actualizado en función de los resultados de la curación de las muestras recolectadas en campo.

## PUBLICACIÓN EN LA WEB

El sistema de gestión de parques y jardines fue concebido como una herramienta administrativa para localizar y gestionar las actividades de mantenimiento a realizarse sobre los parques. Como aporte de la Universidad del Azuay se emprendió un piloto de inventario forestal en 8 parques. El formulario web estuvo orientado a reconocer la especie y determinar el estado de salud de los árboles a través de una evaluación al tronco, ramas, hojas y problemas potenciales.

Levantamiento de información en el Parque de la Madre

Para llevar a cabo el inventario forestal en el parque de la Madre se realizó las acciones descritas a continuación enmarcadas en el esquema de trabajo de la figura 2.

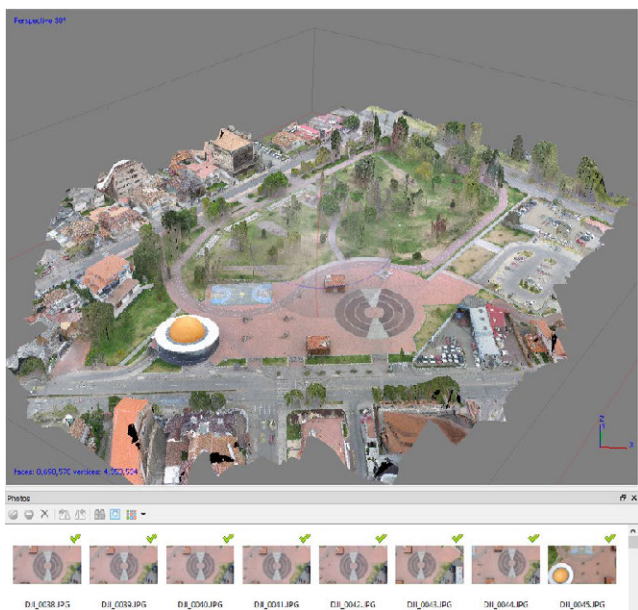
## PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS

- Área de trabajo seleccionada: para el piloto de la metodología se seleccionó el parque de la Madre por ser uno de los más extensos de la ciudad.
- Realización del vuelo: para generar la ortofotografía y MDE usando el dron DJI Phantom 3 Pro y el software Photoscan (figura 4) se deriva los productos de ortofoto y MDE. El procesamiento de información utiliza puntos de control obtenidos a partir de la ortofoto del proyecto Sigtierras para corregir los desplazamientos (X, Y, Z) propios del GPS. La cartografía a generar tiene error (aproximadamente de 5 a 10 metros en X y Y mientras que en el eje Z es variable llegando a tener desplazamientos de 40 metros) por cuanto el GPS del dron no tiene una alta precisión espacial. En este caso al no contar la universidad con un equipo GPS Diferencial se utilizará puntos de control obtenidos a partir

<sup>1</sup> El Sistema Nacional de Información y Gestión de Tierras Rurales e Infraestructura Tecnológica – SIGTIERRAS, es un programa del Gobierno Nacional del Ecuador, ejecutado por el Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca – MAGAP, en asocio con los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM), para contribuir a la eficiente gestión y administración territorial en el Ecuador, mediante la gestión de ortofotografía basada en fotografía aérea, cartografía temática a nivel nacional y catastro e información predial de 57 cantones. Fuente: <http://www.sigtierras.gob.ec/descripcion-del-programa/>

de la ortofotografía del proyecto Sigtieras. Debido a los cambios en la urbe en estos equipamientos se dificulta el proceso de detectar puntos de control adecuados ya que para este sitio puntual la ortofoto de Sigtieras se genera el 13 de septiembre del 2010.

- c) Corrección y depuración de elementos: la cartografía de los 43 parques se debe actualizar en función de los cambios que se detecten con la ortofotografía actual usando para ello los Sistemas de Información Geográfica (SIG). En el parque de la Madre se ha detectado la remoción de árboles y la inclusión de zonas de ejercicio como modificaciones a los datos existentes.



#### INVENTARIO FORESTAL

- d) Selección de árboles a inventariar: se estableció criterios de selección de árboles a inventariar como que el mismo supere la altura de 1,5m. Esto con la finalidad de evitar incluir en el inventario arbustos o árboles que puedan removerse por acciones de mantenimiento del parque.
- e) Llenado de formulario del árbol: El formulario de datos móvil involucrará información que permita reconocer la especie de los árboles, una valoración de la copa, fenología, tronco, manejo forestal, evaluación del tronco, problemas potenciales, estado fitosanitario y un registro fotográfico. Estos datos permitirán establecer el estado de vigorosidad del árbol.
- f) Envío de datos de formulario móvil a servidor: a través de la plataforma ODK se automatiza la carga de datos desde el formulario del móvil al servidor del geoportal de la Universidad del Azuay. Los datos se cargarán en una base de datos PostgreSQL con extensión Postgis.

#### VALIDACIÓN DE DATOS

- g) Evaluación de valores recolectados por personal del herbario: con la finalidad de asegurar la calidad de los datos

los mismos no estarán públicos hasta que hayan sido validados por los especialistas del Herbario Azuay cuya labor consiste en verificar la información recolectada en campo en conjunto con el proceso de curación de las especies existentes. Para ejecutar esta acción se agregó una opción al sistema de gestión de parques y jardines para que se revise los árboles en estado de espera de validación.

- h) Evaluación del estado de salud: con los parámetros descritos en el formulario se pretende establecer una valoración del estado de salud de cada árbol inventariado para determinar el tipo de acción a realizar (en caso de requerirse).

#### PUBLICACIÓN EN LA WEB

- i) Publicación en plataforma web: El resultado final es la publicación de la información en el sistema de gestión de parques y jardines. Estos datos además se conectarán al Sistema Nacional de información (SNI<sup>2</sup>) de Senplades a través del servicio estándar Web Map Service (WMS).

### III. RESULTADOS

La información recolectada está disponible en la página web <http://gis.uazuay.edu.ec/herramientas/emac/ifa/app/>. En la misma se puede consultar los elementos cartografiados, actualizados y la ubicación de los árboles (figura 5). Al seleccionar la herramienta de información y hacer un clic sobre el árbol a consultar se despliega el formulario del mismo.

Con la inclusión del uso de tecnologías móviles se ha tenido que actualizar el sistema de gestión de parques y jardines para que pueda conectarse a la información recibida del inventario forestal.

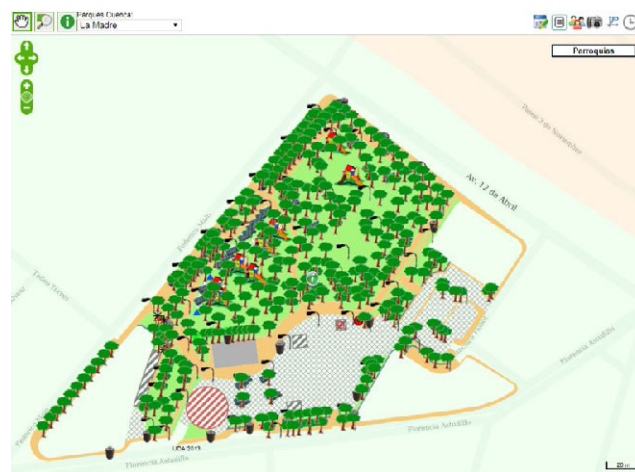


Figura 5. Portal web actualizado con la información de parques y jardines

La prueba de ejecución del inventario en el parque de la Madre permitió establecer criterios fundamentales como por ejemplo la rigurosidad en la codificación de los árboles ya que este elemento permitirá vincular el elemento geográfico con el formulario del árbol. En síntesis los datos base empleados y la información generada para el inventario forestal del parque de la Madre se puede apreciar en la tabla I.

<sup>2</sup> El Sistema Nacional de Información (SNI), es coordinado por la Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo (Senplades) y constituye el conjunto organizado de elementos que permiten la interacción de actores con el objeto de acceder, recoger, almacenar y transformar datos en información relevante para la planificación del desarrollo y las finanzas públicas\*. Fuente: <http://sni.gob.ec/inicio>  
\* Código de Planificación y Finanzas Públicas, Art. 33 Registro Oficial No.306, año 2010

**TABLA I**  
RESUMEN DE DATOS DEL PARQUE DE LA MADRE

DATO	VALOR
Superficie del parque	31.024,38 m <sup>2</sup>
Superficie de Áreas verdes	15.127,50 m <sup>2</sup> (48,76 %)
Fecha de validación de cartografía del levantamiento planimétrico	02/06/2013
Nro. de árboles cartografiados a partir de levantamiento planimétrico	336
Fecha de ortofoto Phantom 3	25/08/2015
Nro. de árboles inventariados	282
Fecha de inventario forestal	12/4/2017

En la figura 6 se puede apreciar la ubicación de los árboles del parque donde los de color verde son aquellos que fueron inventariados mientras que los de color rojo fueron removidos o no superaron la altura de 1,5 m por lo cual no fueron considerados para ser registrados en el inventario forestal. De cada uno de los árboles inventariados existe el formulario web como el que puede observarse en la figura 7 (página siguiente).



Figura 6. Revisión de árboles cartografiados

A partir de los datos recolectados en la sección de “Problemas potenciales” se realiza una valoración de la vigorosidad de los árboles atendiendo a criterios como si la madera es quebradiza, la inclinación del tronco, heridas o daños en el tronco, problemas con las raíces, afección por plagas y afección por enfermedades. Para la valoración de estos elementos se realizó una asignación de valores a cada criterio cuyo promedio representa la vigorosidad del árbol. Al final este valor debe estar comprendido entre 0 y 1 proponiendo los rangos de valores y categorías dispuestos en la tabla II.

**TABLA II**  
CATEGORIZACIÓN DE ÁRBOLES POR SU VIGOROSIDAD

CATEGORÍA	RANGOS DE VALORES
Muy Vigorosos	> 0,75
Vigorosos	>0,50 - <=0,75
Poco vigorosos	>=0,25 - <=0,50
Enfermos	<0,25

En la figura 7 (página siguiente) podemos ver la localización espacial de los árboles categorizados. Se debe recalcar que dentro del parque de la Madre sólo se encuentran árboles pertenecientes a la categoría Muy Vigorosos y Vigorosos. En la figura 8 podemos observar la ubicación de los árboles clasificados por su vigorosidad dentro del parque. Al ser un trabajo que se va a ejecutar entre los años 2017 y 2018 los factores y valores propuestos para la categorización podrían modificarse.

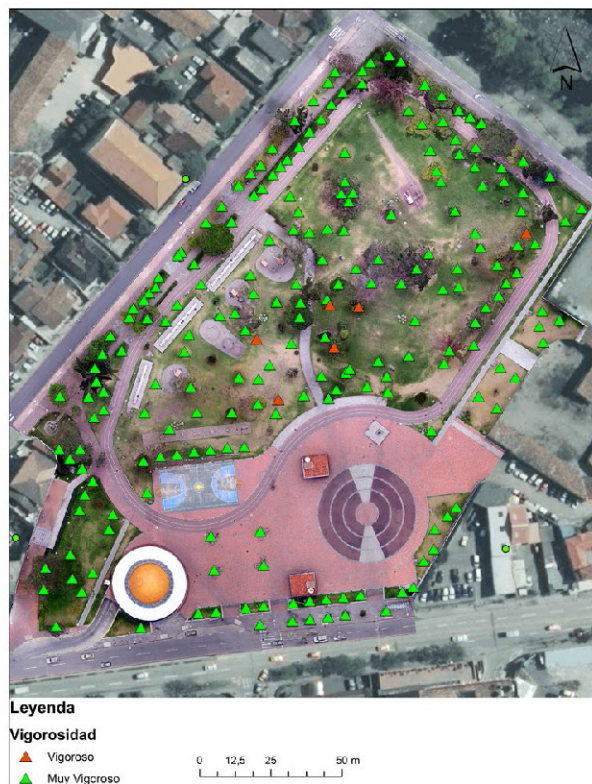


Figura 8. Categorización de la vigorosidad de los árboles del parque de la Madre

Enviado: 2017-03-15 a las 16:59



INVENTARIO DE ARBOLADO URBANO DE CUENCA			
<b>Fecha Levantamiento</b>	2017-03-10	<b>Responsable</b>	Karla
<b>Código</b>	041POC0001	<b>Verificador</b>	
<b>Parque</b>	41 La Madre		
Identidad			
<b>Familia</b>	Platanaceae	<b>Nombre común</b>	Platano
<b>Género</b>	Platanus	<b>Origen</b>	Introducido
<b>Especie</b>	occidentalis L.		
Copa			
<b>Estructura</b>	Semi-abierta	<b>Forma</b>	Irregular
<b>Color</b>	Verde claro	<b>Diámetro (m)</b>	6.83
Fenología			
<b>Infértil</b>	Si	<b>Flores (%)</b>	0 %
<b>Botones florales (%)</b>	0 %	<b>Frutos (%)</b>	0 %
Tronco			
<b>Altura total (m)</b>	10	<b>DAP (cm)</b>	100
<b>Altura fuste (m)</b>	2.74		
Manejo forestal			
<b>Tipo de poda</b>	De mantenimiento o limpieza	<b>Coronación</b>	No
<b>Intensidad de poda</b>	Media	<b>Observaciones Coronación</b>	Ninguna
<b>Observaciones de la poda</b>	Ninguna		
Problemas potenciales			
<b>Madera quebradiza (pérdida de ramas por desgaje o rotura)</b>		<b>Inclinación del tronco</b>	
Estado: Sin pérdidas		Estado: Recto	
Observaciones: Ninguna		Observaciones: Ninguna	
<b>Heridas o daños al tronco por corte a la corteza, pudriciones, etc.</b>		<b>Problemas con las raíces</b>	
Estado: Heridas o daños hasta el 10% de la circunferencia		Estado: Sin problemas aparentes	
Observaciones: Ninguna		Observaciones: Ninguna	
Estado fitosanitario			
<b>Afección por plagas (herbivoría, daños hojas, ramas y tronco)</b>		<b>Afección por enfermedades (necrosamiento, clorosis, etc.)</b>	
Estado: Del 5% al 10% de hojas y ramas dañadas por plagas		Estado: Del 5% al 10% de hojas y ramas dañadas por enfermedades.	
Observaciones: Ninguna		Observaciones: Ninguna	
Fotos			
<b>Foto 1:</b>		<b>Foto 2:</b>	
			
<input type="button" value="Validar"/>			

Figura 7. Formulario de árbol inventariado en el parque de la Madre

#### IV. CONCLUSIONES

El contar con información cartográfica del parque antes de realizar el inventario forestal ha permitido optimizar los recursos y mejorar la planificación de la ejecución del mismo.

Dentro del proceso de planificación deben existir políticas robustas de codificación de árboles ya que por los errores de desplazamiento del GPS, tanto del dron como del teléfono inteligente, el vincular estos datos por el factor espacial puede producir inconsistencias. En este caso esto se realiza en la etapa de actualización cartográfica.

A pesar que la información del dron tiene su desplazamiento espacial se ha tratado de reducir el mismo a través de puntos de control tomados a partir de la ortofotografía del proyecto Sigtierras. Por la variación de la zona y el tamaño de pixel se ha reducido la cantidad de puntos por parque a 4.

Para la prueba de la metodología el personal encargado de realizar el inventario forestal son biólogos de la Universidad

del Azuay. La plataforma tecnológica queda lista para que pueda ser utilizada por cualquier usuario que disponga de un teléfono inteligente con sistema operativo Android.

La prueba piloto permitió proponer una metodología de trabajo adecuada para la realización del inventario forestal. La misma podrá modificarse de acuerdo a los avances del trabajo y ejecución del proyecto.

El contar con la valoración de la vigorosidad de los árboles permitirá a las instituciones responsables tomar acciones oportunas sobre el tratamiento de los árboles.

Los problemas potenciales que puede tener un árbol son variables con el tiempo. Dentro de este esquema de trabajo se propondrá la ejecución de revisiones temporales y se pueda reportar casos específicos en cuanto al estado de vigorosidad de un árbol.

#### AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro agradecimiento a la Universidad del Azuay que a través del vicerrectorado de investigaciones financió y permitió la ejecución de este proyecto. De igual forma agradecemos al Blgo. Danilo Minga en representación del Herbario de la Universidad del Azuay que apoyaron en el diseño del formulario para el inventario forestal de cada árbol y con los procesos de validación de la información generada.

#### REFERENCIAS

- Austin, R. (2011). Unmanned aircraft systems: UAVS design, development and deployment (Vol. 54). John Wiley & Sons.
- Ballari, D., Vilches, L., Perez, D., Pacheco, D., & Fernández, V. (2014). Tendencias en infraestructuras de datos espaciales en el contexto latinoamericano, 177-184. Retrieved from <http://dspace.uca.edu.ec/handle/123456789/21364>
- Delgado, O. (2013). Sistemas de control y gestión de parques, jardines y áreas verdes administrados por la EMAC - EP para la ciudad de Cuenca. Cuenca.
- El Tiempo. (2015). Cuenca no cuenta con suficientes áreas verdes. Retrieved June 6, 2017, from <http://www.eltiempo.com.ec/noticias/cuenca/2/364332/cuenca-no-cuenta-con-suficientes-areas-verdes>
- Flores-Xolocotzi, R., & De Jesús González-Guillén, M. (2007). Consideraciones sociales en el diseño y planificación de parques urbanos, 24(24), 913-951.
- INEC. (2010). Urban Green Index Presentation. Índice Verde Urbano INEC.
- Li, X., Zhang, C., Li, W., Ricard, R., Meng, Q., & Zhang, W. (2015). Assessing street-level urban greenery using Google Street View and a modified green view index. *Urban Forestry and Urban Greening*, 14(3), 675-685. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2015.06.006>
- Madriz, B. (2016). Guía para el uso de dispositivos Android en el llenado de encuestas bajo la plataforma Open Data Kit.
- Reyes, I., & Gutiérrez, J. (2010). Los servicios ambientales de la arborización urbana: Retos y aportes para la sustentabilidad de la Ciudad de Toluca. *Quivera*, 12(1), 96-102. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40113202009%5Cn%20mo>
- Treepedia :: MIT Senseable City Lab. (n.d.). Retrieved June 13, 2017, from <http://senseable.mit.edu/treepedia>
- TreesCount! 2015 : NYC Parks. (n.d.). Retrieved June 12, 2017, from <https://www.nycgovparks.org/trees/treescount>
- Uysal, M., Toprak, A. S., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 73(June), 539-543. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2015.06.010>
- Vera, D. (2016). Cuenca aún tiene un déficit de áreas recreativas. Retrieved June 6, 2017, from <http://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/septimo-dia/51/cuenca-aun-tiene-un-deficit-de-areas-recreativas>



# Infraestructuras de datos espaciales: Propuesta de implementación en la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Universidad Nacional, Costa Rica

Cedeño-Montoya Bepsy<sup>1</sup>, Mondragón-Alemán, Kimberly<sup>2</sup>, Moraga-Peralta Julio César<sup>3</sup>, Solano-Mayorga, Manuel Antonio<sup>4</sup>

1 Programa en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (PROSIGTE), Escuela de Ciencias Geográficas/Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar/Universidad Nacional  
Campus Omar Dengo/Heredia/Costa Rica  
bepsy.cedeno.montoya@una.cr

2 Programa en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (PROSIGTE), Escuela de Ciencias Geográficas/Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar/Universidad Nacional  
Campus Omar Dengo/Heredia/Costa Rica  
kimberly.mondragon.aleman@una.cr

3 Programa en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (PROSIGTE), Escuela de Ciencias Geográficas/Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar/Universidad Nacional  
Campus Omar Dengo/Heredia/Costa Rica  
julio.moraga.peralta@una.cr

4 Programa en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (PROSIGTE), Escuela de Ciencias Geográficas/Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar/Universidad Nacional  
Campus Omar Dengo/Heredia/Costa Rica  
manuel.solano.mayorga@una.cr

## RESUMEN

Este trabajo tiene relación con el primer intento de establecer una Infraestructura de Datos Espaciales para la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar, Universidad Nacional, Costa Rica. En este proyecto participan diferentes investigadores de las Unidades Académicas; algunos con experiencia en el manejo de la información geográfica y otros no, sin embargo, en todos los casos, los proyectos tienen como común denominador el manejo de información geográfica. UNA - RED - IDE - FCTM tiene como objetivo principal implementar una metodología que permita la estandarización y homologación de la información geográfica de los proyectos de investigación y extensión de la FCTM. De cada unidad académica se han seleccionado proyectos, para un total de 20, posteriormente cada investigador deberá replicar la metodología en otros proyectos de cada unidad, permitiendo que todos los proyectos de la FCTM logren estandarizar y homologar la información geográfica. El proyecto ha permitido consolidar un grupo de trabajo que trata de estandarizar la información, aportando elementos a la normativa nacional, por ejemplo nuevos objetos geográficos que no se encuentran en el Catálogo Nacional de Objetos Geográficos o métodos para la creación de metadatos. Por último, se pretende al final del proyecto incentivar a todos los académicos de la Universidad Nacional en estandarizar y homologar la información geográfica para que la misma pueda ser publicada en el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT).

Palabras clave: IDE, información geográfica, estándares, normativa, Costa Rica.

## ABSTRACT

*This work shows the first attempt to establish a Spatial Data Infrastructure for the Faculty of Earth and Sea Sciences, National University, Costa Rica. This project involves different researchers from the Academic Units; some with experience in the management of geographic information and others not, however, in all cases, projects have as their common denominator the management of geographic information. FCTM's main objective is to implement a methodology that allows the standardization and homologation of the geographic information of the research projects and extension of the FCTM. Have been selected 20 projects, at least two from each academic unit, and each researcher will then have to replicate the methodology in other projects, allowing all FCTM projects to standardize and homologate*

*geographic information. The project has allowed the consolidation of a working group that tries to standardize the information, contributing elements to the national regulations, for example new geographical objects that are not in the National Catalog of Geographic Objects or methods for the creation of metadata. Finally, it intended at the end of the project to encourage all academics of the National University to standardize and homologate the geographical information so that it can be published in the National System of Territorial Information (SNIT).*

**Keywords:** *SDI, Geographical information, standards, regulations.*

## I. INTRODUCCIÓN

El Instituto Geográfico Nacional (IGN) de Costa Rica se encuentra impulsando el desarrollo e implementación de una Infraestructura de Datos Espaciales para Costa Rica (IDECORI), trabajo que oficialmente da inicio con el decreto ejecutivo 33773 JP-H-MINAE-MICIT del 7 de mayo del 2013, publicado en el Diario Oficial La Gaceta N°134 del 12 de julio de 2013, con el que se crea el Sistema Nacional de Información Territorial (SNIT) y se busca el establecimiento y consolidación de la IDECORI.

El 9 de marzo de 2016 el IGN anuncia la oficialización de una serie de Normas Técnicas de Información Geográfica (NTIG) para el país.

Para Costa Rica, la oficialización de estas normas implica un avance en el manejo de la Información Geográfica (IG) en cuanto a estandarización de datos espaciales pues aunque se han realizado diversos esfuerzos para implementar la IDE, por uno u otro motivo no se han obtenido los resultados esperados.

La Escuela de Ciencias Geográficas desde ya varias décadas ha venido colaborando con el IGN en diversas iniciativas para implementar estrategias en el manejo de la IG. Es por lo anterior que en el 2015 se consigue financiamiento interno para desarrollar el proyecto UNA Red Infraestructura de Datos Espaciales de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar (UNA - RED - IDE - FCTM) y el cual pretende colaborar desde la academia con el IGN en el desarrollo de IDECORI.

Mediante esta propuesta se busca homogenizar criterios dentro de la Universidad Nacional, iniciando por la FCTM, con respecto al manejo de la IG, para su catalogación y homologación de acuerdo a los estándares nacionales.

Además se pretende contribuir con el IGN a crear cultura, en los generadores y usuarios de información geoespacial, sobre aplicación de estándares en la creación, manejo y tratamiento de información geográfica, problema nacional que requiere del apoyo de todos los sectores y actores para resolverlo.

## II. MÉTODO

Una IDE puede definirse como un conjunto de datos espaciales, tecnología, normas, estándares y planes institucionales que ayudan a facilitar la disponibilidad y acceso a dichos datos espaciales (Olaya, 2012). Las IDEs nacen ante la necesidad de facilitar el acceso y el uso de la información geográfica, al considerarla un insumo fundamental para los proyectos que se basan en plantear soluciones ante problemáticas sociales, ambientales, económicas, que involucren una visión integral del territorio. (Gómez, 2010).

El desarrollo de las IDE trae consigo un nuevo planteamiento en el que los datos necesitan elementos adicionales para ser verdaderamente productivos. Una Infraestructura de Datos Espaciales es, por tanto, mucho más que datos. Como indica Nebert (2004), una IDE incluye, además de los datos y atribu-

tos geográficos, documentación suficiente (los denominados metadatos), un medio para descubrir, visualizar y valorar los datos (catálogos y cartografía en red) y algún método para proporcionar acceso a los datos geográficos (generalmente, Internet es el medio principal). Además, debe haber servicios adicionales o software para permitir aplicaciones de los datos. Por último, para hacer funcional una IDE, también debe incluir los acuerdos organizativos necesarios para coordinarla y administrarla a escala regional, nacional y transnacional (Olaya, 2012).

En el caso de Costa Rica, la iniciativa IDE la lidera el IGN y ha sido denominada IDECORI. A la fecha se han publicado, mediante la página del SNIT ([www.snitcr.go.cr](http://www.snitcr.go.cr)), seis documentos titulados:

- NTIG\_CR01\_01.2016: Sistema de Referencia Geodésico de Costa Rica
- NTIG\_CR02\_01.2016: Catálogo de Objetos Geográficos para Datos Fundamentales de Costa Rica
- NTIG\_CR03\_01.2016: Modelo de Datos Geográficos de Costa Rica, escalas 1:1000, 1:5000 y 1:25000
- NTIG\_CR04\_01.2016: Perfil Oficial de Metadatos Geográficos de Costa Rica.
- NTIG\_CR05\_01.2016: Estándares para la Publicación Web de la Información Geográfica de Costa Rica
- NTIG\_CR06\_01.2016: Especificaciones cartográficas para el Mapa Topográfico escala 1:25000 de Costa Rica.

Como indica el IGN (2016) en el anuncio de oficialización, todos estos documentos son:

*... la primera versión de una iniciativa que facilitará y adecuará el intercambio de información en el ámbito del sector público, sector privado, personas físicas y público en general, además de promover una manera precisa y ordenada sobre la difusión y uso de los datos geográficos.*

Entre las múltiples instituciones generadoras y usuarias de datos geográficos a nivel nacional, ha existido un grupo que ha venido apoyando al IGN en sus intentos de consolidar una IDE. Estas instituciones son Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC), Tribunal Supremo de Elecciones (TSE), Centro Nacional de Información Geoambiental (CENIGA-MINAE), Universidad Nacional (UNA), Programa de Investigaciones Aerotransportadas (PRIAS), Instituto Nacional de Biodiversidad (INBIO). De las anteriores solo las primeras tres han comenzado a implementar una IDE institucional con el objetivo de uniformar y estandarizar el trasiego de la información geográfica dentro de sus instituciones.

La UNA, representada por el Programa en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección (PROSIGTE) de la Escuela de Ciencias Geográficas (ECG), ha participado de todos esos intentos que guiaron a lo que hoy es IDECORI, apoyando al IGN y liderando una serie de eventos a nivel nacional (Encuentros



de Usuarios en Sistemas de Información Geográfica y Telede-tección), cuyo objetivo es colocar sobre la mesa el tema de la importancia de la creación de una IDE para Costa Rica.

Debido a que hoy día se cuenta con la normativa oficial, la UNA pretende seguir apoyando la consolidación de la IDECORI mediante tres áreas claves que le permiten colaborar con el desarrollo del país: docencia, investigación y extensión.

El PROSIGTE, como parte de la ECG, está adscrito a la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar (FCTM), que además está compuesta por otras dos unidades académicas (Escuela de Ciencias Agrarias - ECA, Escuela de Ciencias Ambientales - EDECA) y cinco institutos (Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre - ICOMVIS, Instituto de Investigación y Servicios Forestales - INISEFOR, Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas - IRET, Observatorio Vulcanológico y Sismológico de Costa Rica - OVSICORI, Centro de Investigaciones Apícolas Tropicales - CINAT) los cuales tienen relación directa con el manejo de la información geográfica, pero con el agravante que cada centro procesa la información de acuerdo a sus intereses.

Según el Plan Estratégico de la FCTM, la misma aspira convertirse en una instancia académica de referencia a nivel nacional e internacional en campos y disciplinas relacionadas a la conservación y manejo de especies, sistemas de producción sostenibles, calidad ambiental y salud, cambio climático, gestión del territorio, entre otros. Todo lo anterior se encuentra estrechamente relacionado al uso y gestión de la IG, por lo cual una red que se ocupe de estos aspectos fortalecerá a la FCTM, a la UNA y al país en general.

Por lo anterior es que dos unidades académicas (ECG y ECA) junto a los cinco institutos que forman parte de la FCTM decidieron crear y participar del proyecto UNA-RED-IDE-FCTM, como una forma de fortalecer los programas y los proyectos inter y multidisciplinarios de investigación y extensión, a través de procesos de intercambio, vinculación interna y externa, para que generen conocimientos innovadores y aportes sustantivos a la sociedad.

La UNA-RED-IDE-FCTM busca que todos los académicos que generan y procesan IG lo hagan bajo los estándares y normas que el IGN ya ha oficializado, de esta manera se podrá construir una cultura, primero a nivel de facultad, después a nivel de la Universidad Nacional y por último a nivel nacional para estandarizar la información geográfica en cualquier ámbito de acción y/o investigación.

Después de analizar las pasadas experiencias en el intento de consolidar esfuerzos para implementar una IDE nacional, como también este nuevo intento por parte del IGN, la UNA desea ser un agente reproductor para capacitar a funcionarios, técnicos, académicos, etc., que se encuentren interesados en aplicar la normativa para el tratamiento de la IG propuesta por el IGN.

La UNA como una entidad académica debe aportar al país sus experiencias para el desarrollo del mismo, es por esto que se plantea que una entidad universitaria está en la obligación de apoyar todas aquellas iniciativas que busquen el desarrollo del país.

Se aspira a que la Universidad Nacional sea la primera universidad nodo del SNIT y por lo tanto, la primera casa de estudios superiores en que se implemente la estandarización de los datos espaciales en todos los proyectos de docencia, investigación y extensión.

El proyecto, que aún se están ejecutando, consta de una serie de etapas que se detallan a continuación:

1. Elaboración de un diagnóstico sobre los datos geoespaciales, de al menos tres de Proyectos Académicos (PPAA: en el área de docencia, investigación y/o extensión) de las unidades participantes que crean y utilizan las unidades académicas e institutos pertenecientes a la FCTM.

El diagnóstico se realizó con el fin de identificar el nivel de conocimiento y aplicación de normas IDE que tienen los académicos de la facultad, el tipo de datos espaciales que crea o utilizan, las fuentes y escalas de los datos así como el tipo de software utilizado.

2. Realizar un proceso de capacitación de los integrantes en la Infraestructura de Datos Espaciales.

La red está integrada por al menos un representante de cada una de las unidades académicas e institutos mencionados anteriormente. Cada uno de estos académicos posee una formación base diferente, por lo que hay diversidad de profesiones: geógrafos, ingenieros forestales, químicos, especialistas en silvicultura y manejo de recursos naturales, entre otros, por lo que cada uno cuenta con un nivel de experiencia diferente en el manejo de datos geoespaciales.

La capacitación, para el grupo de trabajo, es fundamental con el fin de poseer todos un nivel básico de conocimiento sobre lo que son las IDE, que normativa ha generado IDECORI y cómo aplicarla a las diferentes áreas de conocimiento que se desarrollan en la FCTM.

3. Aplicar el perfil oficial de Metadatos, elaborado por el Instituto Geográfico Nacional, que permita la descripción de los datos geoespaciales de las Unidades e Institutos de la FCTM.

Los metadatos entendido como los "datos acerca de los Datos" (Olaya, 2014: 767) tienen la misión es explicar el significado de los datos. Es decir, ayudan a los usuarios de los datos a entender mejor el significado que estos tienen y la información que guardan. Los metadatos son un documento adicional que acompaña a los datos, y que permite una mejor gestión y una utilización más precisa de ellos.

Se han seleccionado tres PPAA por unidad o instituto participante, de forma tal que se cuente con una serie de datos que ejemplifiquen la labor que se realiza en la FCTM. Se le ha solicitado a los coordinadores de cada proyecto que faciliten los datos generados en el mismo, sean capas vectoriales o en formato raster, y para cada uno de estos datos se ha completado una ficha de metadatos, siguiendo lo establecido en la norma NTIG\_CR04\_01.2016: Perfil Oficial de Metadatos Geográficos de Costa Rica.

4. Clasificar los datos geoespaciales de tres PPAA de las Unidades académicas involucradas de la FCTM utilizando el Catálogo de Objetos propuesto por el Instituto Geográfico Nacional.

Los datos geoespaciales, vectoriales o raster, de cada PPAA participante se están catalogando a partir de la norma NTIG\_CR02\_01.2016: Catálogo de Objetos Geográficos para Datos Fundamentales de Costa Rica, documento en el que se establecen una serie de códigos para catalogar los objetos geográficos representados a nivel cartográfico. A la fecha, el documento está compuesto por 10 temas (entre los cuales están control geodésico, relieve, infraestructura vial y transporte, cobertura y uso del suelo, entre otros) dentro de los cuales se encuentran una serie de grupos de datos para los que se especifican códigos a asignar a cada atributo de los datos.

5. Establecer espacios de comunicación permanentes con los integrantes de la red para la publicación de resultados.

Una vez que se cumpla con la catalogación de los datos de los PPAA seleccionados y con completar los metadatos respectivos, se avanzaría hacia la fase de publicación de resultados mediante publicación en la web utilizando los estándares del Open Geospatial Consortium (OGC) y aplicando la norma NTIG\_CR05\_01.2016: Estándares para la Publicación Web de la Información Geográfica de Costa Rica.

Se busca aprovechar la infraestructura tecnológica existente en la FCTM, utilizando el portal de Mapoteca Virtual (otro proyecto desarrollado en la ECG), para posteriormente avanzar hacia el establecimiento de la UNA como un nodo permanente en el SNIT.

6. Concientizar a la comunidad universitaria sobre la necesidad de estandarizar y catalogar la información geográfica.

Esta tarea se ha venido desarrollando mediante charlas, en las que personeros del IGN han explicado a académicos y estudiantes de la UNA en que consiste IDECORI, su importancia, cuál es la normativa que de ahí surge, en que consiste el SNIT y el visor cartográfico, como utilizar los servicios publicados y como contribuir a consolidar la IDE nacional.

De igual manera PROSIGTE por medio de la organización del Día Internacional del SIG como los Encuentros Nacionales de Usuarios en SIG y TD ha venido apoyando las iniciativas que el IGN ha desarrollado para impulsar las iniciativas IDE, todo esto como parte de los compromisos de una universidad nacional y pública.

También, desde la red IDE se han generado productos y talleres que han permitido iniciar con la divulgación y capacitación de académicos y estudiantes de la FCTM, mediante la docencia en las diferentes carreras universitarias, así como en pequeños talleres sobre elementos concretos de la IDE.

7. Colaborar con el Instituto Geográfico Nacional y otras instituciones en la consolidación de la IDE Nacional.

La labor de la UNA - RED -IDE - FCTM, no se limita a lo interno de la UNA, aunque es el público meta, pues al utilizar la normativa se han identificado problemas para la aplicación y se han están proponiendo alternativas y soluciones que se espera puedan ser consideradas por el IGN.

Además se continúa trabajando con instituciones a nivel nacional en la realización de eventos de divulgación de los primeros resultados de aplicación de la normativa y en el desarrollo de nuevas propuestas de estandarización para sectores que aún no han sido considerados por el IGN, como los gobiernos locales o en temas como la elaboración de mapas de Cobertura y Uso de la Tierra.

El PROSIGTE tiene entre su programación el desarrollar un pequeño programa de capacitación virtual en el tema de IDE, específicamente de aplicación de normas de IDECORI, dirigido a interesados a nivel nacional, tanto del sector público como privado.

### III. RESULTADOS

A pesar de que la UNA-RED-IDE-FCTM fue formulada por siete escuelas e institutos, solo cinco han participado de forma activa. Se seleccionaron un total de 14 PPAA participantes, los cuales han facilitado una serie de datos vectoriales y raster a los que se están aplicando los estándares de IDECORI (ver Tabla I).

**TABLA I**  
LISTADO DE PPAA PARTICIPANTES EN UNA-RED-IDE-FCTM

UNIDAD ACADÉMICA O INSTITUTO	NOMBRE DEL PPAA PARTICIPANTE
Escuela de Ciencias Geográficas (ECG)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicación de la herramienta GPS en la enseñanza de Cartografía</li> <li>• Balance hídrico de la Región Central de Costa Rica.</li> <li>• Programa de Estudios Turísticos Territoriales.</li> </ul>
Instituto Internacional en Conservación y Manejo de Vida Silvestre (ICOMVIS)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interacciones entre el ser humano y la fauna silvestre, y las implicaciones para la salud de las poblaciones, en el Parque Nacional Manuel Antonio, Costa Rica.</li> <li>• Interacciones entre humanos y crocodilidos en Costa Rica.</li> <li>• Monitoreo biológico de jaguar (<i>Panthera onca</i>), Puma (<i>Puma concolor</i>), otros felinos silvestres y sus presas naturales en Costa Rica.</li> </ul>
Instituto de Investigación y Servicios Forestales (INISEFOR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoreo de ecosistemas forestales para el fortalecimiento de estrategias de conservación y uso de bosques: una contribución a la iniciativa Costa Rica Carbono Neutral.</li> <li>• Monitoreo continuo de plantaciones forestales en Costa Rica</li> <li>• Laboratorio de Teledetección de Ecosistemas</li> </ul>
Instituto Regional de Estudios en Sustancias Tóxicas (IRET)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tendencias, riesgos e impactos asociados al cultivo de palma aceitera en el Pacífico Sur (Pipal Sur).</li> <li>• Gestión integral participativa del agua en la microcuenca Potrero Caimital (GIPA).</li> </ul>
Centro de Investigaciones Apícolas Tropicales (CINAT)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Evaluación de compuestos fenólicos Totales y la capacidad Antioxidante de los Propóleos provenientes de varios pisos altitudinales en Nicoya, Guanacaste</li> <li>• Valoración de la presencia y contenido de esteroides de forbol y alcaloides pirrolizidínicos en miel de abejas producida en CR</li> </ul>

A partir del diagnóstico realizado en la FCTM se ha identificado que existe un bajo nivel de conocimiento sobre IDE y su aplicación a los diferentes tipos de datos que se generan en las unidades académicas e institutos.

La ECG, escuela integrada por académicos de profesión geógrafos, es el único espacio de la FCTM donde hay conocimiento claro sobre la IDE y su importancia, sin embargo los estándares IDECORI solo son aplicados en dos proyectos adscritos a la unidad a pesar de que se crea gran cantidad de datos.

En el resto de unidades académicas e institutos, la generación de datos es incipiente suelen realizar levantamientos de tipo puntual, utilizando herramientas GPS (navegadores), que permiten representar sitios de muestreo o la presencia de elementos de interés.

El CINAT es el instituto con menor conocimiento aplicado en el tema, son usuarios muy básicos de navegadores GPS y solo los utilizan para conocer las coordenadas de puntos de interés las cuales anotan en tablas, sin llegar a crear archivos vectoriales para representarlas cartográficamente.

Se identificó que en el ICOMVIS y en el IRET las investigaciones se realizan con apoyo de profesionales o estudiantes de la Escuela de Ciencias Geográficas, en quienes se delegan las tareas de creación y manejo de datos espaciales. Lo que explica el poco conocimiento de los coordinadores de proyectos académicos en materia de estandarización de datos espaciales.

Otra de las etapas en las que se ha venido trabajando es en la aplicación de la norma NTIG\_CR04\_01.2016: Perfil Oficial de Metadatos Geográficos de Costa Rica, para lo que se ha solicitado a los participantes de la RED el recopilar la información

básica de cada uno de los datos geográficos correspondientes a los distintos PPAA. Se busca que esta información permita: identificar el dato (título, palabras clave, resumen, objetivos, formato, información de contacto, entre otros), conocer quién y cómo se distribuye, como fue generado el dato (representación espacial, sistema de referencia, calidad) y finalmente identificación del mismo metadato.

Por el nivel de conocimiento de los académicos integrantes de la RED sobre temas IDE y manejo de programas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) la tarea de completar metadatos ha sido compleja. Con el fin de facilitar el proceso y pensando en la incorporación futura de otros colaboradores de ramas ajenas a la geografía, es que se diseñó una guía para la creación de metadatos.

El documento se denomina “Opciones de implementación del Perfil Oficial de Metadatos Geográficos para Costa Rica” y fue generado orientar el proceso de creación de metadatos, cumpliendo con la normativa emanada del IGN y considerando el nivel de experiencia del usuario en el tema,

En la guía se ofrece al usuario la posibilidad de utilizar una de tres plataformas: el software libre Geonetwork (programa que propone el IGN para la generación de metadatos), el programa licenciado ArcCatalog (parte del ArcGIS de ESRI, del cual la UNA cuenta con una licencia CAMPUS), y los documentos en Office Word.

En la guía se incluye el proceso de instalación de Geonetwork y software complementario, explicando luego como importar las plantillas de metadatos creadas por el IGN, como completarlas, validarlas y exportarlas. Para la creación de metadatos en ArcCatalog se describe como seleccionar el perfil de metadatos correspondiente a las plantillas de la norma de IDECORI, el proceso de importación, llenado y exportación de las plantillas, como visualizarlas, validarlas y exportarlas desde Geonetwork, de forma tal que cumplan a cabalidad con el estándar. Finalmente, se incluye como completar en Word la información requerida para los metadatos, esta última opción pensando en aquellos usuarios con experiencia nula en el uso de programas SIG y que pueden acercarse a miembros de la UNA-RED-IDE-FCTM para trabajar de forma conjunta en esta norma.

La guía se está implementando con los académicos integrantes de la RED, ya que su diferente nivel de experiencia permite conocer si lo que se colocó en el documento es suficiente para guiar a otros usuarios, con poca experiencia, en el proceso.

**TABLA II:**  
LISTADO DE CAPAS CON METADATOS CONSTRUIDOS, SEGÚN PPAA PARTICIPANTE EN UNA-RED-IDE-FCTM

NOMBRE DEL PPAA PARTICIPANTE	CAPAS	TIPO DE DATO
Aplicación de la herramienta GPS en la enseñanza de Cartografía	Mosaico_Este	Raster
	Mosaico_Oeste	Raster
	Mosaico_fotosgeo-referenciadas	Raster
	Red_Total	Vector
	Red1_Campus	Vector
	Red1_Heredia	Vector
Interacciones entre el ser humano y la fauna silvestre, y las implicaciones para la salud de las poblaciones, en el Parque Nacional Manuel Antonio, Costa Rica.	Red2_Heredia	Vector
	Red1y2_Heredia	Vector
	Puntos_GPS_MA	Vector
Interacciones entre humanos y cocodrilos en Costa Rica.	Edificaciones_cerca_manuelantonio	Vector
	Capturas_Cocodrilos	Vector
Monitoreo biológico de jaguar (Panthera onca), Puma (Puma Concolor), otros felinos silvestres y sus presas naturales en Costa Rica.	CocodrilosConteo	Vector
	Base_Datos2012	Vector
Evaluación de compuestos fenólicos totales y la capacidad antioxidante de los propóleos provenientes de varios pisos altitudinales en Nicoya, Guanacaste	Base_Datos2012	Vector
	SantaRosa_2011	Vector
Valoración de la presencia y contenido de esteres de forbol y alcaloides pirrolizidinicos en miel de abejas producida en Costa Rica.	CompuestosFenolicosTotalesNicoya-Guanacaste	Vector
	Polen_en_Mielles_MICIT	Vector
Laboratorio de Teledetección de Ecosistemas	EstacionesMeteo-lógicas	Vector
	NDVI	Raster

La UNA-RED-IDE-FCTM está por iniciar con la tarea de clasificación de los datos geoespaciales de tres PPAA de las Unidades académicas involucradas de la FCTM utilizando el Catálogo de Objetos propuesto por el Instituto Geográfico Nacional, para posteriormente avanzar hacia publicación de las capas y los metadatos como geoservicios en la UNA y en el SNIT.

Se ha trabajado en la concientizar a la comunidad universitaria sobre la necesidad de estandarizar y catalogar la información geográfica, pues se han impartido talleres sobre el tema. El pasado 12 de junio de 2017, funcionarios del IGN realizaron una presentación abierta al público en la que explicaron en que consiste IDECORI, que normas se han publicado y a importancia de cada una, los servicios OGC que se han puesto a disposición en el SNIT con una demostración práctica sobre cómo acceder a ellos.

Respecto a la colaboración con el Instituto Geográfico Nacional y otras instituciones para la consolidación de la IDE Nacional, tras la revisión que se realiza actualmente del documento “Opciones de implementación del Perfil Oficial de Metadatos Geográficos para Costa Rica” se buscará presentarlo antes los funcionarios a cargo del tema en el IGN con el fin de que valoren su divulgación a terceros usuarios. Se plantea hacer lo mismo con cualquier otra documentación que se genere en la UNA-RED-IDE-FCTM respecto a aplicación de los otros estándares.

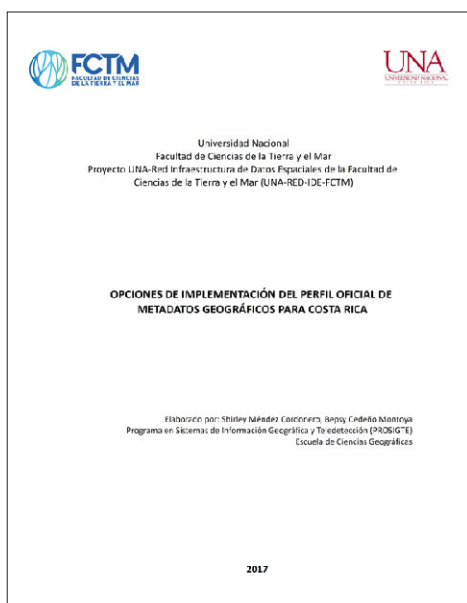


Figura. 1. Vista del documento “Opciones de implementación del Perfil Oficial de Metadatos Geográficos para Costa Rica”.

Es importante señalar que todo lo aprendido está siendo trasladado a la docencia de las unidades académicas involucradas en el proyecto, ofreciendo al estudiantado contenido actualizado y contribuyendo a la divulgación e implementación de la normativa de IDECORI.

#### **IV. CONCLUSIONES**

La implementación de una IDE nacional es una tarea que le compete a una gran cantidad de instituciones públicas, así como a la empresa privada y organizaciones no gubernamentales, pues son múltiples los usuarios y los interesados en la información geográfica y ahí la importancia de contar con datos geoespaciales estandarizados que permitan conocer con certeza el estado, formato y calidad de los mismos.

El rol de las universidades, como centros de enseñanza e investigación debe estar ligado siempre a la búsqueda de beneficios para la colectividad y el apoyar iniciativas nacionales como la divulgación y consolidación de una IDE es parte de esas tareas.

Las formas de contribuir son muchas y en el caso del proyecto UNA-RED-IDE-FCTM se colabora aplicando la normativa a la diversidad de campos del conocimiento en los que se genera

y utiliza información geográfica, señalando vacíos en la documentación y generando material que permita aclarar esos temas, incorporando lo aprendido a la docencia y en procesos de capacitación continua, facilitando espacios de divulgación y presentación de resultados, así como apoyando a todas aquellas instituciones y organizaciones que se encuentren en procesos de implementación de IDEs.

La experiencia de la UNA-RED-IDE-FCTM apenas está empezando y sin embargo las lecciones aprendidas son muchas, por ejemplo: desconocimiento de conceptos básicos como escalas y sistemas de proyección para la creación y el manejo de información geoespacial, la utilización de herramientas SIG y GPS a nivel instrumental sin conocimiento teórico, poca o nula interacción entre unidades académicas o institutos de la FCTM en temas de uso y gestión de información geoespacial, importancia de mostrar espacialmente las áreas donde trabaja la UNA mediante actividades y proyectos de los PPAA, valor agregado de los datos geográficos cuando se les aplican estándares de la información geográfica, entre otros.

Se continuará trabajando en la consolidación del proyecto, la incorporación de más unidades académicas, institutos y facultades de la UNA, con el fin seguir apoyando al IGN y al país en tan importante labor.

#### **AGRADECIMIENTOS**

A los académicos Mónica Retamosa Izaguirre, Eduardo Umaña Rojas, Mauricio Vega Araya y Leonel Córdoba Gamboa, y a la estudiante Shirley Méndez Cordonero, miembros de la UNA-RED-IDE-FCTM, por sus contribuciones al proyecto. A las autoridades de la FCTM por el apoyo en la gestión administrativa de la Red.

#### **REFERENCIAS**

- Olaya, V. (2012). Sistemas de Información Geográfica. Versión revisada el 16 de octubre de 2014. Disponible en <http://volaya.github.io/libro-sig/>
- Nebert, D. (2004) Developing Spatial Data Infrastructures: The SDI Cookbook. sl: Global Spatial Data Infrastructure Association.
- Gómez, J. (2010). Desarrollo de una Infraestructura de Datos Espaciales Ferroviaria basada en Software Libre. IV Jornadas de SIG libre. Universitat de Girona.
- Decreto ejecutivo 33797-MJ-MOPT. Ministerio de Justicia y Gracia. Costa Rica. Diario Oficial La Gaceta. San José, Costa Rica. 12 de julio de 2013.



**Cartografía,  
catastro y  
Sistemas de  
Información  
Geográfica  
municipales**



# Construcción de modelos combinando la econometría y el aprendizaje de máquina para el avalúo catastral de predios urbanos y rurales

Zhindón Martín<sup>1</sup>, Quevedo Sebastián<sup>2</sup>, Angamarca Pablo<sup>3</sup>, Córdova Federico<sup>1</sup>

1 Centro de Investigación/Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción/Universidad Católica de Cuenca  
Av. de las Américas/Azuay/Ecuador  
mgzhindonm@ucacue.edu.ec  
nfcordovag@ucacue.edu.ec

2 Ingeniería de Sistemas/Facultad de Tecnologías de la Información/ Universidad Católica de Cuenca sede Azogues  
Av. Ernesto Cheguevara/Cañar/ Ecuador  
asquevedo@ucacue.edu.ec

3 EVOTECH  
Panamericana Sur/Cañar/Ecuador  
pabloangamarca@gmail.com

## RESUMEN

La emisión de las Normas Técnicas para Catastro de Bienes Inmuebles Urbanos y Rurales del Ecuador (NTCBIUR), establecen las directrices para la elaboración de modelos de valoración de bienes inmuebles basados en la econometría. En este contexto este trabajo consiste en la construcción de modelos combinando la econometría y técnicas de aprendizaje de máquina (ML), por sus siglas en inglés, para el modelado eficiente de relaciones entre variables económicas complejas, para el avalúo de predios urbanos y rurales. La econometría es una técnica que ha sido empleada de manera convencional para representar relaciones entre variables económicas y realizar predicciones, y su enfoque ha sido la validación de modelos que parten de asumir que los datos provienen de modelos estocásticos, por otro lado existen técnicas modernas que se han desarrollado para la manipulación de los datos, los cuales no analizan la naturaleza de donde provienen los datos, ni el grado de relación que pueda existir entre variables, éstas técnicas emplean modelos a través de algoritmos que permiten realizar predicciones a partir de los datos, y no se centran en analizar los modelos sino la precisión de sus predicciones. La combinación de estas dos técnicas se realiza utilizando el modelo convencional empleado en la econometría para representar relaciones entre variables y el uso de técnicas empleadas en ML, para llegar a establecer los parámetros de éste modelo. Este documento es un reporte de resultados preliminares de las metodologías y técnicas empleadas para la actualización de los avalúos catastrales de los bienes inmuebles del cantón Déleg.

Palabras clave: **econometría, aprendizaje de máquina, datos, modelos, predicciones.**

## ABSTRACT

*The Technical Standards for Cadastre of Urban and Rural Real Estate of Ecuador establish guidelines for the elaboration of models of property valuation based on econometrics. In this context, this work consists of the construction of models combining econometrics and machine learning techniques, for the efficient modeling of relations between complex economic variables, for the valuation of urban and rural properties. Econometrics is a technique that has been used conventionally to represent relationships between economic variables and make predictions, and its focus has been the validation of models that assume the data come from stochastic models, on the other hand there are modern techniques that have been developed for the manipulation of data, which do not analyze the nature of where*

*the data come from, nor the degree of relationship that may exist between variables, these techniques use models through algorithms that allow to make predictions from the data , And do not focus on analyzing the models but the accuracy of their predictions. The combination of these two techniques is done using the conventional model used in econometrics to represent relationships between variables and the use of techniques used in ML, in order to establish the parameters of this model. This document is a report of preliminary results of the methodologies and techniques used for the updating of the cadastral valuation of canton Déleg.*

*Keywords: econometrics, machine learning, data, models, predictions.*

## I. INTRODUCCIÓN

En el Ecuador la Dirección Nacional de Avalúos y Catastros (DINAC) se institucionalizó en el año de 1966 con el fin de crear un inventario centralizado de las propiedades rurales (Lopez Chavez, n.d.), recientemente y luego de cincuenta años, la DINAC emite las NTCBIUR, En ésta se establecen los criterios técnicos y las metodologías para su aplicación a nivel nacional. La NTCBIUR obliga y faculta a los Gobiernos Autónomos Descentralizados Municipales (GADM) a emplear modelos econométricos para la valoración de bienes inmuebles (Dirección Nacional de Avalúos y Catastros, 2016). Por esta razón es necesario que los GADM analicen sus métodos de valoración que emplean actualmente y reformulen o crear nuevos modelos acordes a la normativa.

Los avalúos de bienes inmueble urbanos o rurales son establecidos considerando los precios comerciales actualizados en la zona, y realizados con conocimientos científicos, técnicos o artísticos (Contraloría General del Estado, 2016).

El caso de estudio seleccionado es el cantón de Déleg<sup>1</sup> por encontrarse en proceso de renovación de su plataforma tecnológica de gestión de catastro de bienes inmuebles, y al igual que el resto de cantones, sus GADM tiene que realizar la actualización de su catastro acorde a la NTCBIUR.

La metodología actual de valoración con la que cuenta el GADM del cantón Déleg, fue adoptada en el año 2005, mediante convenio de transferencia tecnológica a través de la Asociación de Municipalidades del Ecuador (AME). A través de este convenio entró en funcionamiento el sistema de avalúos catastrales, que automatiza la valoración de los bienes inmuebles. El convenio se limitó a la instalación del sistema y a la capacitación técnica con respecto a la herramienta tecnológica para su mantenimiento, pero no se transmitió el fundamento de la metodología que emplea para la valoración. Debido a esto la valoración ha sido guiada y se ha llevado a cabo mediante la herramienta tecnológica compuesta de un sinnúmero de indicadores, variables, formularios, pero sin conocer cuál es su fundamento, prácticamente, el instrumento es el que determina la valoración, sin un criterio técnico o científico, y mucho menos considerando la realidad del territorio. Este desconocimiento hace que la evaluación del método y su análisis se vuelva extremadamente complejo al momento de determinar si se ajusta a las metodologías propuestas por la NTCBIUR, siendo muchas veces la exploración del código fuente del aplicativo la única manera de comprender en alguna medida su funcionamiento.

Debido a la dificultad, la falta de conocimiento técnico o científico de los métodos de valoraciones y a la necesidad de adaptarse a la nueva normativa de NTICURB, el propósito de este trabajo es crear modelos para la valoración de bienes

combinando la econometría y una rama de la inteligencia artificial conocida como aprendizaje de máquina.

Las computadoras actualmente se encuentran involucradas en la mayoría de las transacciones, entre estas las económicas, permitiendo capturar éste tipo de datos (Varian, 2014). Una técnica común utilizada para manipular y analizar estos datos es la econometría. La econometría en sus primeras definiciones se conceptualiza como la unificación de las matemáticas, la estadística y la teoría económica, para comprender las relaciones cuantitativas de la vida económica (Frisch & Waugh, 1933). Una definición moderna establece que es la aplicación de las matemáticas estadísticas, herramientas de la inferencia estadística para la medición empírica de relaciones postuladas por una teoría de base. Las técnicas econométricas han sido empleadas en diversos campos como la política, la salud, transporte, ingeniería entre otras (Greene, 2012). De igual manera la NTICURB establece que la valoración de los bienes se puede realizar mediante la aplicación de éstos principios econométricos.

Por otro lado otra técnica utilizada para analizar estos datos es ML. El término ML fue introducido por primera vez por Samuel, (1959) quien lo definió como el campo de estudio en donde las computadoras son capaces de aprender sin la necesidad de ser programadas explícitamente. Posteriormente apareció una definición contemporánea y completa que indica que un programa de computadora aprende de la experiencia E con respecto a una tarea T y una medida de rendimiento P, si su rendimiento en la tarea T, medido por P, mejora con la experiencia E (Mitchell, 1997).

ML es una rama de la Inteligencia Artificial que trata con el desarrollo de algoritmos que pueden ser utilizados por las computadoras para el aprendizaje automático de patrones en los datos (Satnam, 2009).

ML y la econometría buscan patrones que puedan ser extraídos de los datos. El análisis de datos en la econometría entre otros busca predecir u obtener información de los datos mientras que ML esta principalmente enfocado en la predicción (Varian, 2014).

Las dos técnicas utilizan las matemáticas y la estadística para el tratamiento y análisis de los datos. La diferencia radica en que la econometría asume que los datos a ser analizados provienen de modelos estocásticos y éstos se utilizan para estimar parámetros de un modelo cuya validación se hace de acuerdo a pruebas de ajuste y análisis de residuos. El enfoque de ML por otro lado es encontrar un algoritmo que opere sobre entradas para predecir salidas, la validación del algoritmo se mide por la precisión en su predicción (Breiman, 2001).

Este documento es un artículo de reporte de caso. En éste se proporcionan detalles técnicos, metodológicos y resultados

<sup>1</sup> Déleg, cantón perteneciente a la provincial del Cañar.



preliminares en el proceso de la creación de un modelo matemático que combina la econometría y el aprendizaje de máquina, para el avalúo catastral de predios. No se abordan los criterios de selección de variables, las relaciones entre éstas, y tampoco su grado de influencia al momento de establecer avalúo.

El objetivo es crear un modelo combinando la econometría y ML ajustados a la NTICURB para la valoración de predios mediante el desarrollo de un algoritmo de aprendizaje personalizado que sea capaz de predecir el avalúo de un terreno en función de sus características físicas y económicas.

## II. MÉTODO

A pesar de que las técnicas convencionales estadísticas y de econometría funcionan correctamente, existen otras que permiten formas más efectivas de expresar relaciones económicas complejas, como ML. En este contexto tanto las técnicas de la econometría y minería de datos se encuentran fundamentadas en las matemáticas y la estadística, la diferencia es que la primera posee un componente adicional que es la teoría económica mientras que la segunda se fundamenta en la implementación de algoritmos. En este trabajo se utilizarán de manera combinada estas dos técnicas para crear un modelo que permita relacionar características de los predios, y a través de estos realizar predicciones sobre los avalúos.

Los parámetros que definen la ecuación que más se ajusta a los datos son obtenidos del entrenamiento del algoritmo de ML. Para verificar la validez de los parámetros obtenidos, las muestras se dividen en dos conjuntos, el primero correspondiente a datos de entrenamiento, el segundo a datos de prueba. Previo a la aplicación se realizará un proceso de escalado de las variables independientes, para finalmente encontrar la ecuación que mejor determine el precio del bien a valorar.

### A. COMBINACIÓN DE LA ECONOMETRÍA Y ML

Aunque la econometría puede ser empleada para hacer predicciones su principal aplicación es la estimación y análisis de modelos, su principal herramienta es el modelo de regresión múltiple y es considerado el único instrumento para realizar investigaciones empíricas. El modelo de regresión múltiple se utiliza para encontrar las relaciones entre las variables independientes o explicativas y la variable dependiente. A continuación el modelo de regresión lineal múltiple está definido por la ecuación [1]:

$$\hat{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon \quad (1)$$

$$= x_1\beta_1 + x_2\beta_2 + \dots + x_k\beta_k$$

donde  $\hat{y}$  es la variable explicada;  $x_i$  son las variables explicativas,  $\varepsilon$  es el error y  $\beta$  son los parámetros del modelo (Greene, 2012). La estimación de los parámetros se realiza mediante los mínimos cuadrados, que en su forma más simple es la de Mínimos Cuadrados Ordinarios (MCO), éste estima los parámetros como los valores que minimizan la suma de los errores  $\varepsilon$  entre los valores observados y los que predice el modelo, ecuación [2]:

$$\varepsilon = \sum_I (y - \hat{y})^2 \quad (2)$$

donde  $y$  es el valor observado y  $\hat{y}$  la predicción (Abdi, 2003). El enfoque de MCO para minimizar el error en un modelo de regresión lineal simple son las derivadas, mientras que para la regresión múltiple es el álgebra de matrices (Abdi, 2003). Éste es el enfoque convencional que utiliza la econometría para

estimar los parámetros del modelo. La combinación entre la econometría y ML consiste en reemplazar éstos dos métodos de estimación de parámetros convencionales, por un método de ajuste de aproximación numérica utilizado en ML denominado Algoritmo de Descenso de Gradiente (ADG).

La pendiente de gradiente es un método iterativo que trata de encontrar los mejores valores de estimación. En cada paso se hace una aproximación y esta se va mejorando sucesivamente conforme avanzan las iteraciones (Abdi, 2003). El ADG es la implementación de éste método utilizando un lenguaje de programación específico. Las redes neuronales consideradas parte de ML, constituyen una aplicación contemporánea del empleo de este método.

### B. ML Y REGRESIÓN MULTIVARIADA

Los algoritmos supervisados de regresión, buscan predecir resultados como una salida continua, para lo cual realizan un mapeo de los datos de entrada a una función que produzca esta salida continua, estableciendo una relación entre los datos de entrada y una salida conocida. En este caso la función de mapeo es la ecuación [3], que corresponde al modelo de regresión múltiple con notación empleada en ML (Ng, n.d.).

$$h_{\theta}(x) = \theta_0 + \theta_1 x_1 + \dots + \theta_k x_k \quad (3)$$

El algoritmo implementado aprende los parámetros  $\theta$  a partir de los datos, e intenta minimizar la función de costo, ecuación [4].

$$J(\theta) = \frac{1}{2m} \sum_{i=1}^m (h_{\theta} x^{(i)} - y^{(i)})^2 \quad (4)$$

En ML, la función de costo es análoga a la función del error que usa la econometría. ADG se encarga de encontrar los parámetros  $\theta$  que minimicen la función de costo.

### C. EXTRACCIÓN, TRANSFORMACIÓN Y CARGA DE DATOS

Una de las actividades más importantes en esta etapa es la selección de variables que en conjunto sean determinantes en el avalúo del predio, ya que la precisión de las predicciones del modelo depende los parámetros que el algoritmo aprenda de los datos de entrenamiento. Las características seleccionadas del predio para su valoración son: servicios básicos, poblaciones cercanas al predio, vías, riego, topografía, drenaje, erosión, forma del predio, tipo de riesgos y área.

Una vez seleccionadas las características se procede a extraer de la base de datos del sistema de catastros, los predios y sus atributos utilizando el lenguaje SQL. Con la finalidad de eliminar registros atípicos, los predios a cargar en el algoritmo ML serán los que cumplan los siguientes criterios: precio > \$5000 y área < 77 Ha.

Además es necesario realizar un proceso de transformación de todos los atributos cualitativos para que puedan ser cuantificados y utilizados para cargar y entrenar el algoritmo ML. Las tablas I y II muestran la codificación de atributos ordinales y nominales respectivamente.

**TABLA I**  
Codificación de datos Ordinales

FORMA DEL PREDIO	CODIFICACIÓN
Regular	3
Irregular	2
Muy irregular	1

**TABLA II**  
CODIFICACIÓN DE DATOS NOMINALES

TIPO DE RIESGO	CODIFICACIÓN
Deslaves	1
Hundimiento	1
Volcánico	1
Inundación	1

#### D. VALIDACIÓN

Luego de la fase de entrenamiento, el resultado que devuelve el algoritmo es el modelo con los parámetros resultantes de la etapa de aprendizaje. La validación de éste se realiza utilizando el conjunto de datos de prueba, y su validez se establece en base a la precisión con la que realiza las predicciones.

### III. RESULTADOS

A continuación se presenta el ADG implementado con el lenguaje de programación Octave<sup>2</sup>, éste se utilizó para encontrar los parámetros  $\theta$  del modelo para la predicciones de avalúos.

```

for i = 1:iteraciones
    predicciones = X * theta;
    error = predicciones - y;
    delta_aux = zeros(length(theta),1);
    delta_aux = X' * error;
    delta = (alpha * (1/m)) .* delta_aux;
    theta = theta - delta;
end

```

Luego de haber desarrollado el algoritmo ML, se obtuvieron 7090 predios rurales de la base de datos. Éstos contienen todas las características del predio en función de las cuales se realiza el avalúo del inmueble, además constituyen los registros válidos, luego de la eliminaron de los registros atípicos. El 50% de éstos se utilizaron para el entrenamiento del algoritmo y el restante se utilizó para realizar la validación de las predicciones.

La Figura 1 permite visualizar como se minimiza la función de costo sucesivamente conforme el ADG avanza en cada una de las iteraciones.

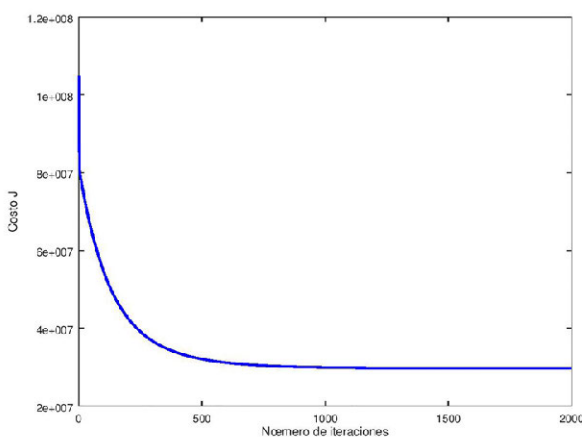


Figura 1. Gráfica que muestra cómo se minimiza el costo J en función de los parámetros  $\theta$  ajustados sucesivamente en cada iteración.

La tabla III contiene una muestra de diez valores correspondientes al conjunto de datos de prueba, para la evaluación del modelo.

**TABLA III**  
Comparación entre predicciones de avalúos por el modelo y avalúos reales

PREDICCIONES	REALES
\$19260.66	\$16945.70
\$5970.07	\$5603.54
\$20808.56	\$24664.53
\$18911.94	\$16088.93
\$20860.55	\$35747.08
\$7360.25	\$6183.98
\$17951.55	\$7108.11
\$21601.58	\$43160.50
\$21585.09	\$25595.46
\$17800.97	\$6438.69

### IV. CONCLUSIONES

La combinación de las técnicas econométricas y de aprendizaje de maquina es posible debido a que las dos se encuentran fundamentas en las matemáticas y la estadística, de esta manera es posible construir modelos que permitan establecer relaciones complejas para la valoración entre las variables independientes, combinando el aprendizaje de máquina para la valoración de predios. El algoritmo ML aprenden del conjunto de muestras de entrenamiento en lugar de programar fórmulas para una tarea específica.

La figura I, muestra que el funcionamiento de ADG es correcto, ya que en cada iteración reduce el costo que es equivalente a la reducción del error cuadrado. A pesar de que el funcionamiento del algoritmo es correcto, si se observa la tabla III, se puede observar que en esa pequeña muestra existen errores muy notables entre las predicciones y el valor real. Esto se debe a que el propósito inicial fue la construcción del modelo, por esta razón, la selección de variables no se realizó con el análisis adecuado, ya que si bien es cierto una variable puede estar relacionada directamente con el avalúo, al combinarla con otras variables puede perder su valor predictivo.

Pese a que el modelo fue probado con datos de predios rurales, éste se puede emplear para la valoración de predios urbanos, sin la necesidad de modificación alguna, ya que al tratarse un algoritmo de ML, lo único que necesita son los datos de entrenamiento, para a través de estos aprender los parámetros para cualquier valoración con cualquier número de variables que representen cualquier característica de los predios.

La metodología que se propone no se encuentra dentro de los enfoques y principios aplicados a la valoración que contempla la normativa NTCBIUR, esto no significa que el modelo no se pueda aplicar, ya que la norma en uno de sus apartados establece que en el caso de emplear otro método de valoración no contemplado, éste puede ser puesto a consideración ante las autoridades competentes (Dirección Nacional de Avalúos y Catastros, 2016).

Con la presentación de estos resultados preliminares y conociendo que el modelo funciona la siguiente etapa es mejorar

<sup>2</sup> <https://www.gnu.org/software/octave/>

la selección de las características de los predios que intervienen en el avalúo.

Este trabajo se puede replicar a otros municipios del Ecuador, ya que se conoce que sus avalúos son en función de la misma herramienta tecnológica implementada y transferida por la AME.

El aporte fundamental de este trabajo al GADM de Déleg es el componente científico, fundamental para el proceso de valoración de acuerdo a la NTCUR, esto marca el enfoque y la diferencia entre el desarrollo de este proyecto y el que pudiera prestar cualquier consultora en tecnología.

## REFERENCIAS

- Abdi, H. (2003). Least Squares., 1-4.
- Breiman, L. (2001). Statistical Modeling: The Two Cultures. *Statistical Science*, 16(3), 199-231.
- Contraloría General del Estado, E. (2016). Reglamento administración y control de bienes del sector público.
- Dirección Nacional de Avalúos y Catastros, E. (2016). Normas técnicas nacionales para el catastro de bienes inmuebles urbanos - rurales y avalúos de bienes; operación y cálculo de tarifas por los servicios técnicos de la Dirección Nacional de Avalúos y Catastros. Retrieved from <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/08/Acuerdo-Ministerial-No-0029-16-Normas-Tecnicas-Nacionales-para-el-Catastro-de-Bienes-Inmuebles-Urbanos-Rurales-y-Avaluos-de-Bienes-Operacion-y-Calculo-de-Tarifas-de-la-Dinac.pdf>
- Frisch, R., & Waugh, F. V. (1933). Partial time regressions as compared with individual trends. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 387-401.
- Greene, W. H. (2012). *Econometric Analysis*. Prentice Hall. <https://doi.org/10.1198/jasa.2002.s458>
- Lopez Chavez, J. R. (n.d.). Historia y evolución del catastro en el Ecuador. Retrieved from [http://www.catastrolatino.org/documentos/bogotanov2005/ponencia\\_ecuador.pdf](http://www.catastrolatino.org/documentos/bogotanov2005/ponencia_ecuador.pdf)
- Mitchell, T. (1997). *Machine Learning*.
- Ng, A. (n.d.). *Machine Learning* | Coursera. Retrieved June 8, 2017, from <https://www.coursera.org/learn/machine-learning/home/welcome>
- Samuel, A. L. (1959). Some studies in machine learning using the game of checkers. *IBM Journal of Research and Development*, 3(3), 210-229. <https://doi.org/10.1147/rd.33.0210>
- Satnam, A. (2009). *Collective intelligence in action*.
- Varian, H. (2014). *Big Data: New Tricks for Econometrics*.



# Evaluación de Método de Corrección Geométrica de Fotografía Aérea escala 1:1.000 capturada por vehículos aéreos no tripulados estableciendo una red Geodésica de cuarto orden

Rivera Yela Juan Pablo<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Postgrados/  
Universidad del Azuay - DRONEXT  
Cia. Ltda.  
Calle del Varayo L-95 y De Los Cere-  
zos - Cuenca/Azuay/Ecuador  
juanpablorivera@hotmail.com

## RESUMEN

La presente investigación evalúa la calidad y precisión del levantamiento de fotografía aérea con nuevas herramientas tecnológicas. Para ello se realizó el levantamiento de fotografía a escala 1:1.000 de un área de 30 hectáreas por medio de un Vehículo Aéreo no Tripulado (UAV por sus siglas en inglés), más conocido como Drone; esto en la ciudad de Paute, provincia de Azuay (sierra sur del Ecuador). Para ello se estableció una red geodésica de cuarto orden o GCP (Ground Control Point) para corregir los errores de posicionamiento del drone, con programas especializados. Con esta información se procesaron los datos del levantamiento de fotografía aérea y se compararon con las especificaciones técnicas generales para realización de cartografía topográfica a cualquier escala, y con las Especificaciones Técnicas para Ortofotos Digitales, para dadas por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM). Se pudo comprobar que el ortofotomosaico realizado con el drone cumple con las especificaciones técnicas mencionadas tanto en su precisión horizontal como vertical.

Palabras clave: **UAV (Unmanned Aerial Vehicle), drone, IGM (Instituto Geográfico Militar), REGME (Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador), GCP (Ground Control Point)**

## ABSTRACT

*This research carried out in the city of Paute, Azuay province (southern Ecuador, mountain region), evaluates the quality and precision of aerial photography with new technological tools. In order to achieve this, a picture at a 1: 1.000 scale of a 30 hectare area was taken through an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) better known as Drone, which required establishing a fourth order geodetic network or GCP (Ground Control Point) to correct drone positioning errors through specialized programs. With this information, the data of aerial photography survey were processed and compared with the technical specifications for implementing topographic maps of any scale, as well as with the Technical Specifications for Digital Orthophotography provided by the Military Geographic Institute of Ecuador (IGM, as per its Spanish acronym). It was found that the orthophotomosaic made with the drone meets the technical specifications both in horizontal and vertical accuracy.*

Keywords: **UAV (Unmanned Aerial Vehicle), Drone, IGM (Military Geographic Institute), REGME (GNSS Continuous Monitoring Network of Ecuador), GCP (Ground Control Point)**

## I. INTRODUCCIÓN

Los vehículos aéreos no tripulados UAV's (Unmanned Aerial Vehicle) por sus siglas en inglés, se los define como un vehículo aéreo motorizado, que no lleva a bordo tripulante humano, y que por su propulsión se mantiene en sustentación. (Velasco, et al, 2012; Cuerno, 2015)

Con el desarrollo y advenimiento de la tecnología (a partir de la última década), tanto de posicionamiento (DGPS, GLO-NASS), como el desarrollo de la fotografía digital, y sensores aeroportables (cada vez de menor peso y dimensiones), el desarrollo de los UAV's de diversos usos civiles y comerciales se ha masificado.

Ha existido mucho debate a nivel local y nacional sobre la exactitud y precisiones de los productos obtenidos en los levantamientos con UAV's; es por esto que el presente estudio pretende evaluar el Método de Corrección Geométrica (Georeferencial) de Fotografía Aérea capturada por un UAV, estableciendo una red Geodésica de cuarto orden en 30 hectáreas (aprox.) de la ciudad de Paute, cantón Paute de la provincia del Azuay; siguiendo las especificaciones técnicas generales para realización de cartografía topográfica a cualquier escala dadas por el IGM (2006).

La presente investigación permite conocer si las precisiones y exactitud de los datos obtenidos con un UAV son los requeridos por el Instituto Geográfico Militar para este tipo de estudios.

Los levantamientos de fotografía aérea a detalle, utilizando la metodología tradicional de tomas con aviones tripulados, presentan varios limitantes, entre estos los elevados costos de toma de fotografía aérea tradicional, condiciones óptimas climáticas para vuelos tripulados, tramitología de permisos para vuelos, entre otros; en tanto que el levantamiento de fotografía aérea con drones representa costos menores, las condiciones de clima no son tan estrictas debido a las alturas de vuelo, los permisos de vuelo son menos complicados de obtener, mantienen mayores precisiones, ahorran tiempo en los levantamientos, entre otras (Coello y Ballesteros, 2014).

Por tanto se plantea que el levantamiento de fotografía aérea con UAV / Drone de 30 hectáreas (aproximadamente) a escala 1:1.000 de la ciudad de Paute cumple los estándares de calidad y precisión que requiere el IGM en sus "Especificaciones Técnicas Generales para la realización de Cartografía Topográfica a cualquier Escala (Primer Borrador)" y además con las "Especificaciones Técnicas para Ortofotos Digitales (Primer Borrador); estableciendo una red geodésica de cuarto orden.

## II. MÉTODO

El sitio de estudio, se ubica al noroeste de la provincia del Azuay (sierra sur del Ecuador), en el cantón Paute, parroquia del mismo nombre, con mayor especificidad en la zona sur de la ciudad de Paute. La superficie levantada fue de 30 hectáreas (ha) de las aproximadamente 400 ha que presenta la ciudad. (INEC, 2011) (Anexo 1)

### 2.1. ARMADO DE LA RED GEODÉSICA DE 4TO ORDEN O PUNTOS DE CONTROL DE SUELO (GCP)

Como primer paso se identificó la zona de la ciudad de Paute, que contenga una superficie aproximada de 30 ha (el tamaño elegido se basa en que con esta superficie se puede obtener una muestra representativa de la ciudad, a mas que es un tamaño manejable por el volumen de información) para realizar las mediciones, además, que conste de zonas urbanas consolidadas, por consolidar, infraestructura vial, y lotes baldíos (Fi-

gura 1). Como segundo paso fue la adquisición de la memoria técnica de la estación Cuenca (CUEC) de la REGME, que, por su cercanía (28,7 km) al sitio de estudio fue la más indicada para usar los datos para el post-procesamiento.

Luego, se realizaron las mediciones para la Red Geodésica de 4to Orden o Punto de Control de Suelo (GCP por sus siglas en inglés), ésta constó de 6 puntos. Con el uso de dos DGPS (Spectra Promark 120); mismos que estaban programados como móviles para que tomen los datos en modo Cinemático - Stop and Go, y almacenen sus datos para post-procesamiento, con un tiempo no menor a 30 minutos de lectura por cada punto (antena nivelada horizontal y verticalmente a 1,5 m). (Pachas, 2009).



Figura 1. Medición de Puntos de control (GCP)

### 2.2. POST - PROCESAMIENTO DE DATOS LEVANTADOS PARA LA RED GEODÉSICA DE 4TO ORDEN O GCP

Luego de realizado el levantamiento de red geodésica en campo, se realizaron las correcciones de pos-procesamiento de los datos por medio del programa GNSS Solutions (programa propio del DGPS) y Trimble Business Center V3.4.

*Procesamiento con programa GNSS Solutions.*

Para el post-proceso de los datos, se debe considerar el día GPS de la estación Cuenca (CUEC), mismo que inicia desde las 19h00 del día 20/02/2016; y culmina a las 17h00 del día 21/02/2016, cubriendo de manera adecuada las horas de levantamiento o medición de la red geodésica de cuarto orden o GCP; misma que fue efectuada entre las 10h30 hasta 13h30 del 21/02/2016. Se debe indicar que al crear un proyecto nuevo en este programa, es necesario calibrar los datos de Datum, y demás parámetros para que sean compatibles con los datos de los GCP y con los datos de la estación CUEC. Luego de este paso, se procede a generar el reporte de procesamiento, en donde se obtienen las coordenadas corregidas y sus residuales.

*Procesamiento con Programa Trimble Business Center (v. 3.4)*

El procedimiento es similar al programa anterior, se adicionan los puntos, previo a la colocación adecuada del Datum, y el elipsoide de referencia. Con un mecanismo similar al programa anterior, se realiza la corrección con los datos de la estación CUEC; de la misma manera se generan los vectores de corrección y se genera el reporte de corrección de los datos y sus residuales.

Se debe anotar que tanto los DGPS, el Plan de Vuelo, el drone, y los parámetros de calibración de los programas empleados para el post-procesamiento de datos crudos de los DGPS (GNSS Solutions, Trimble Business Center), así como el de post - procesamiento del drone (Pix4DMapper) estaban con las siguientes coordenadas:

- Proyección: UTM
- Datum: WGS84
- Zona de Referencia: 17 Sur

### 2.3. PLANIFICACIÓN DE VUELO

Un paso previo al vuelo es la planificación del mismo, el cual se lo realiza con el programa eMotion 2 propio del Drone (Ebee Ag) en donde se seleccionan los siguientes parámetros del vuelo:

- Tipo de cámara: WX RGB
- Radio de área de trabajo: 950 m a la redonda para que cubra el área de estudio
- Altura máxima del área de trabajo: como techo para que el Drone no sobrepase la altura programada, 390 m para este vuelo.
- Definición del tamaño del pixel: 10 cm.
- Traslape lateral y longitudinal: del 75% en ambos casos, para densificar puntos y evitar sombras.
- Velocidad promedio del viento: 6 m/s; tomado de las estaciones meteorológicas más cercanas.
- Máximo tiempo de vuelo: 35 min.
- Ubicación del punto de despegue/aterrizaje y punto de Home (Casa): este lugar debe ser despejado por lo menos en 80 metros de largo por 30 metros de ancho, es decir sin obstáculos como edificios, casas, árboles, cables de alta tensión, antenas, entre otros, que puedan causar alguna colisión o accidente.
- Además se incluye un modelo digital de elevaciones el sitio de estudio para que el Drone calcule gradientes de altura para obtener siempre el mismo tamaño de pixel
- Dibujo del polígono de levantamiento: 30 ha
- Se realiza una simulación de vuelo para comprobar que todos los parámetros estén correctamente colocados (Emotion 2 Manual, 2015).

Las horas de vuelo óptimas son de 9H00 hasta 16H00, para evitar sombras por los crepúsculos, a más se debe constatar las condiciones meteorológicas como vientos fuertes y presencia de lluvias, en ese caso el Drone no podrá volar.

Con todas estas especificaciones técnicas, las características resultantes del plan de vuelo fueron:

- Número de Vuelos: 1
- Tiempo estimado del Vuelo: 21:26 minutos
- Distancia total del Vuelo: 13,6 km
- Cobertura total del Suelo: 30 ha
- Número de líneas de Vuelo: 8 transversales y 5 longitudinales
- Espacio entre líneas de vuelo: 104 m
- Distancia entre fotos: 76,7 m
- Cobertura de una sola foto: 416,2 x 306,9 m (127.731,72 m<sup>2</sup> o 12,77 ha)
- Número de Fotos: 99

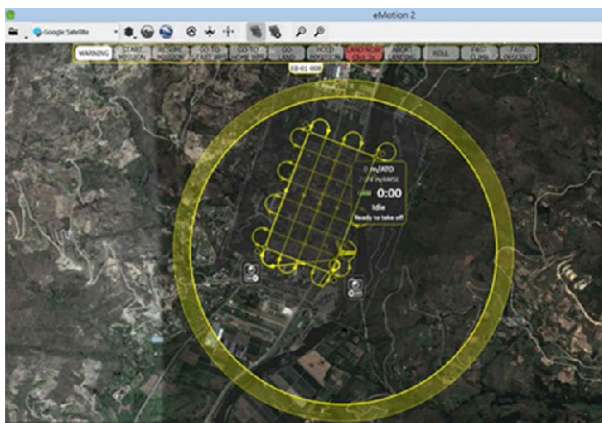


Figura 2. Plan de Vuelo para Sitio de Estudio

### 2.4. EJECUCIÓN DEL VUELO.

Previo a la ejecución del vuelo, con la red geodésica de 4to orden o GCP establecida; se procedió a la colocación de Land-Marks (Marcas de Tierra o Suelo) en los 6 puntos de control previamente medidos. Estas marcas de tierra son 10 veces mayores al tamaño del pixel del levantamiento, para este caso el tamaño de pixel no será superior a los 10 cm, por tanto el tamaño de las marcas de tierra fueron de 1 m<sup>2</sup>. (Anexo 2)



Figura 3. Marcas de Tierra o Suelo (Land Mark)

Una vez colocadas las marcas de suelo en los GCPs medidos se procedió a armar el drone, y a comprobar que la planificación del vuelo este correcta; verificar que no existan obstáculos en la zona de despegue y aterrizaje, y corroborar que la dirección y velocidad del viento sean las adecuadas.



Figura 4. Inicio de Vuelo con UAV

### 2.5. FASE DE LABORATORIO.

Para esta fase se utilizaron programas especializados como el Pix4Dmapper (2016), eMotion2, propios del Drone, en donde se realizaron los siguientes procedimientos:

- Descarga de fotografías aéreas del drone con su respectivo archivo de posicionamiento georeferencial y altitudinal (de los sensores internos del UAV).
- Incorporación de los puntos de control de suelo (GCPs) de la red geodésica levantada.
- Generación de coincidencias entre puntos de control e imágenes procesadas.
- Reporte de calidad, en donde indica solapamiento entre fotos, puntos de enlace, varianza absoluta y relativa de la Geolocalización en X, Y, Z, generación de nube de puntos, generación de DSM (Modelo Digital de Superficies); Generación de Ortofotomosaico. (Pix4DMapper Pro User Manual, 2016).

### III. RESULTADOS

#### 3.1. POST - PROCESAMIENTO DE RED GEODÉSICA DE 4TO ORDEN O GCP

Post - procesamiento con programa GNSS Solutions.

Los datos crudos recogidos por el receptor móvil deben ser procesados para determinar la relación diferencial existente entre los puntos ocupados durante la toma de datos. El resultado del procesamiento de datos brutos DGPS es un vector que define esta relación. El cálculo de estos vectores constituye la tarea del módulo de procesamiento de datos de GNSS Solutions. (GNSS Solutions, 2005).

Con estas consideraciones, los datos obtenidos para los 6 GCP de la red geodésica de 4to orden fueron (Tabla I):

**TABLA I.**  
COORDENADAS MEDIDAS Y POST - PROCESADAS CON PROGRAMA GNSS SOLUTIONS

Código	Xprocesado	Yprocesado	Zprocesado	Xerror	Yerror	Zerror
				95%	95%	95%
P1	748367,679	9690861,391	2202,527	0,158	0,145	0,192
P2	748736,337	9690818,142	2198,921	0,056	0,056	0,055
P3	748877,275	9691088,076	2197,817	0,051	0,055	0,062
P4	748509,008	9691212,009	2198,648	0,056	0,056	0,061
P5	748884,818	9691271,282	2196,808	0,056	0,056	0,057
P6	748579,751	9691389,844	2199,028	0,099	0,12	0,134
<b>PROMEDIO</b>				<b>0,079</b>	<b>0,081</b>	<b>0,094</b>

Como se puede observar en la Tabla I, los residuales de las coordenadas procesadas en cuatro de los 6 puntos, están por debajo de los 10 cm, con excepción del P1 que se encuentra en 0,158 en X; 0,145 en Y, y 0,192 en Z; P6 que tiene un error o incertidumbre de 0,099 en X; 0,120 en Y, y 0,134 en Z; estos errores pueden deberse posiblemente en fallos de lectura del DGPS, o en el momento de realizar el post-proceso con los datos de la estación CUEC los vectores de calibración calculan más error en estos dos puntos. Esto puede significar que al momento de realizar la calibración de la fotografía aérea, el modelo contenga errores superiores a los aceptados por el IGM.

Como se puede observar en la Tabla I, los residuales de las coordenadas procesadas en cuatro de los 6 puntos, están por debajo de los 10 cm, con excepción del P1 que se encuentra en 0,158 en X; 0,145 en Y, y 0,192 en Z; P6 que tiene un error o incertidumbre de 0,099 en X; 0,120 en Y, y 0,134 en Z; estos errores pueden deberse posiblemente en fallos de lectura del DGPS, o en el momento de realizar el post-proceso con los datos de la estación CUEC los vectores de calibración calculan más error en estos dos puntos. Esto puede significar que al momento de realizar la calibración de la fotografía aérea, el modelo contenga errores superiores a los aceptados por el IGM.

Post - procesamiento con programa Trimble Business Center (TBC) v3.4.

El post-procesamiento es muy similar al anterior programa; en primer lugar se coloca el datum, sistemas de coordenadas y demás datos requeridos al nuevo proyecto creado, luego se cargan los puntos levantados en campo por el DGPS (datos crudos), seguido de esto los datos de la estación base CUEC, si se aplica el post-procesamiento (TBC, 2014). En este caso, TBC, detecta dos puntos que sobrepasan el rango de error de 10 cm y para el análisis éstos datos "Desacoplan", por lo que les anula del análisis ya que no entran dentro del 95% de confianza, estos puntos fueron P1 y P2.

Se debe mencionar que P1 y P2 fueron tomados aproximadamente a las 13H00; este mayor error se pudo dar porque algu-

nos de los satélites tuvieron brechas o cortes de información en sus datos, siendo este un indicio de pérdida de ciclo de la señal satelital, errores de gama no válida y otros problemas de perdida de señal. (TBC, 2014)

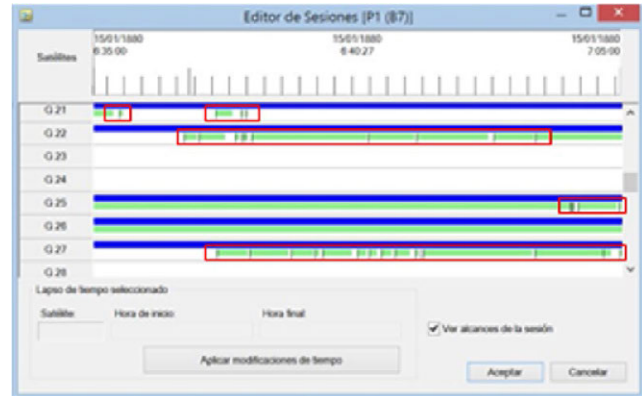


Figura 5. Errores de Información de Satélite para P1

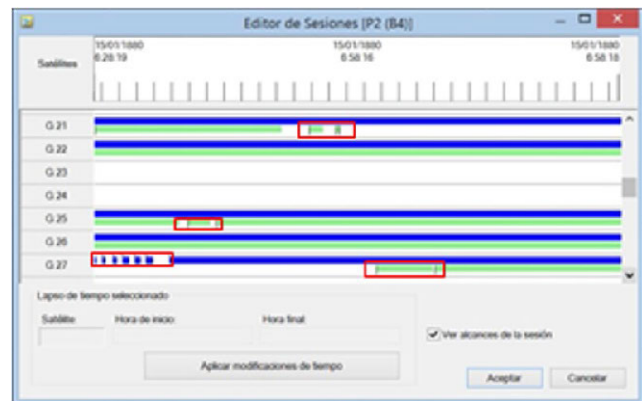


Figura 6. Errores de Información de Satélite para P2

En donde los colores verde y azul representan la continuidad de los datos emitidos por los satélites, en tanto que las líneas de color negro (dentro de los recuadros rojos) muestran la ruptura y la discontinuidad de datos que pudo dar origen a los errores en los puntos mencionados.

**TABLA II.**  
DATOS PROCESADOS POR PROGRAMA TBC (EN ROJO DATOS QUE DESACOPLAN)

Código	Xprocesado	Yprocesado	Zprocesado	Xerror	Yerror	Zerror
				95%	95%	95%
P1	748368,617	9690860,918	2202,94	0,175	0,104	0,114
P2	748737,146	9690818,031	2199,154	0,352	0,141	0,162
P3	748878,163	9691087,93	2197,994	0,011	0,03	0,033
P4	748509,091	9691211,808	2198,566	0,012	0,03	0,031
P5	748885,711	9691271,141	2196,943	0,026	0,04	0,047
P6	748580,254	9691390,243	2198,048	0,017	0,041	0,045
<b>PROMEDIO</b>				<b>0,099</b>	<b>0,0643</b>	<b>0,072</b>

Los Puntos 1 y 2 presentan errores altos con respecto a los demás puntos debido a que las lecturas del DGPS sufrieron pérdida de señal (Figuras 5 y 6), esto provocó que al momento del post-proceso sus residuales sean muy superiores a los otros GCP, por lo que podrían causar ruido en el post-proceso de la fotografía aérea.

Como se puede notar, al comparar las coordenadas resultantes del post-proceso del Programa GNSS Solutions (propio del DGPS Promark 120) y del Trimble Business Center (TBC) v3.4, existen diferencia de 2 a 3 m; se debe indicar que el GNSS Solutions, fue



creado en el año 2005, y hasta el momento no ha tenido actualizaciones; en cambio TBC es del año 2014; por lo que se puede deducir que sus algoritmos de cálculo y calidad de productos es mejor que el GNSS Solutions, pudiendo éstos datos tener mejor grado de confiabilidad (Delgado, Com. per, 2016)

### 3.2. PROCESAMIENTO DEL VUELO

Descarga de datos del vuelo realizado por medio del programa eMotion 2, en donde se descargan los fotogramas y posteriormente los datos de los sensores internos del dron, tanto los de posicionamiento como los de altura.

El siguiente paso es cargar en el Programa Pix4Dmapper la secuencia de las 99 imágenes del vuelo, calibrando al programa con el mismo datum y sistema de coordenadas que se ha estado trabajando.

A continuación, se carga el archivo de posicionamiento y de alturas para que combinen internamente fotos y datos.

Luego de este paso, se importan los puntos de DGPS post procesados, y se inicia la calibración manual con los GCP's (Puntos de control de suelo).

Se debe tener en cuenta que es necesario calibrar por lo menos dos fotogramas para que el programa inicie el mecanismo de post-procesamiento. El mecanismo para el ajuste, es dar un clic sobre el punto de control en la nube de puntos (recuadro rojo), inmediatamente se despliega una pantalla donde aparecen las fotografías en las que el GCP de la red geodésica de 4to orden se encuentra, se realiza un zoom adecuado y se da un clic en el centro del GCP (representado por una cruz amarilla en fondo rojo), y mientras más fotografías se puedan corregir por punto de control mejor será la precisión (circulo azul), luego de realizar los ajustes correspondientes, se da la orden al programa de re-optimizar y ajustar las fotografías a las correcciones efectuadas. Una vez realizado este paso, se generan datos de calibración del GCP ejecutado (recuadro amarillo). Se repite este paso para los 6 GCP de la red geodésica. (Anexo 3)

Luego de la calibración existen datos que muestran la calidad de la calibración entre estos:

- La Varianza a posteriori ( $S^2$ ).- Que da una idea del error de la proyección, valor que al acercarse más a 0 indica la precisión en la calibración del punto.
- Error teórico  $S(X, Y, Z)$ .- Se refiere al error de calibración entre fotografías, se recomienda muestrear en más de 2 fotogramas para reducir esta incertidumbre, mientras más cercano a 0 la corrección es más exacta
- Distancia Ortogonal máxima al haz  $D(X, Y, Z)$ .-La distancia ortogonal máxima es la distancia máxima desde el punto 3D estimado y todos los rayos utiliza para calcular este punto 3D. La distancia se mide entre el punto 3D y el punto definido por la línea perpendicular al rayo que pasa por el punto 3D. Mientras más cercano a 0 su medición es más exacta.
- Error de posición inicial de punto de apoyo.- Error teórico que es calculado a partir de las calibraciones del punto inicial de apoyo.
- Posición Inicial y Posición Calculada.- Son datos de corrección donde muestra en coordenadas los desplazamientos iniciales y los resultados finales.

#### 3.2.1 Modelo 1: Calibración de la Ortofoto con GCP's post-procesados por programa GNSS Solution.

Para poder comparar resultados de precisión y calidad, se rea-

lizó cuatro tipos de calibraciones o post - proceso al vuelo generado con el dron.

En primer lugar se evaluó los resultados con los GCP's post-procesados con el programa GNSS Solutions, en donde se incluyó 6 GCP's de los cuales 4 fueron puntos 3D de Apoyo y 2 Puntos de Control, esto para una mejor calibración; puesto que el programa Pix4DMapper pide como un condicionante la colocación de al menos un Punto de Control (check point), dejando a los demás puntos como Puntos de Apoyo 3D; para la siguiente prueba se colocaron como puntos de control P3 y P4.

El programa Pix4DMapper, genera un reporte de calidad de los productos procesados, que enumera todas las características de los procesos realizados y la calidad de los productos generados (Anexo 4), y entre estos acápite se encuentra los Detalles de Geolocalización (Geolocation Details) de los Puntos de Control de Suelo (Ground Control Points)

En el Anexo 4, se puede observar los rangos de los errores en X, Y, Z, medidos en metros y los errores medios en las tres direcciones de coordenadas. La última columna cuenta el número de imágenes calibradas donde el GCP se ha verificado de forma automática vs la marcada manualmente, en donde la media del error de los 4 puntos 3D en  $X=0,0255$ ; en  $Y=-0,0623$ ;  $Z=-0,1302$ ; errores que no superan los 10 cm a excepción de la altura Z. Pudiendo asumir que los errores entran dentro de un rango bajo según lo requerido por el IGM (2008)

En tanto que en los puntos de control, el error de P3 es exagerado en Z (-0,820 m); y en P4 en X presenta un alto error de 0,691 m y en Z -0,541 m; si lo comparamos con lo que exige el IGM (2008) en calidad y precisión; por lo que este modelo no cumple con la hipótesis planteada

En tanto que el Sigma y el RMS de los puntos de control son muy altos, lo que hace que esta prueba sea poco confiable, sobre todo en las coordenadas X y Z, si lo comparamos con lo que pide el IGM (2008).

El Anexo 5 muestra el mapa en donde constan los GCP's post-procesados sobre el ortofotomosaico corregido en base a estos mismos puntos. En donde se pueden visualizar los errores de posicionamiento.

#### 3.2.2 Modelo 2: Calibración de la Ortofoto con GCP's post-procesados por programa Trimble Business Center con 6 GCP.

Para este modelamiento, igual que el caso anterior, se usaron los 6 GCP, pese a que el Programa TBC descarto 2 GCPs (Punto 1 y 2), por contener mayor error que los anteriores, para que pueda ser comparado con el modelo anterior, se colocaron los mismos puntos de Apoyo 3D (P1, P2, P5 y P6) y como Puntos de Control (Check Points) P4 y P5. De igual manera que el caso anterior el programa Pix4DMapper genera el reporte de calidad.

Como se observa en el Anexo 6, la media de los errores de X, Y, Z; son más bajos, si las comparamos con el modelo anterior, a excepción de X, la media es de -0,0777; Y es -0,0518 y en Z -0,0851; esto dentro de los 4 GCP (P1, P2, P5 y P6). El error de proyección medido en pixels (0,658 cm como promedio), no alcanza a un pixel, siendo su valor más alto el asignado para el punto 3D P5

En donde existe una diferencia significativa con el modelo anterior, es en los Puntos de Control (Check Point) en donde el error en X es de 0,1955, en Y 0,0203 y en Z -0,4766; por lo que su Sigma y RMS también es menor, siendo este modelo más preciso que el anterior. (Anexo 6)

El Anexo 7 muestra la localización de los 6 GCPs post-procesados con referencia al ortofotomosaico calibrado a partir de estos mismos puntos. Este modelo muestra menos desplazamiento de los centros de las marcas de suelo y los GCPs post-procesados, en especial en P2, P3, P5 y P6; en tanto que P1 y P4 se alejan más del centro de la marca de suelo.

### 3.2.3 Modelo 3: Calibración de la Ortofoto con GCP's post-procesados por programa Trimble Business Center con 4 GCP.

Para este modelo, se utilizaron solo los GCP que no desacoplaron en el análisis de post-procesamiento del Programa TBC, siendo estos, P3, P4 y P6, como puntos 3D, y como punto de control (Check Point) P5. Los resultados que a continuación se presenta fueron extraídos del reporte de calidad del modelo 3.

Como se puede observar en el Anexo 8 los puntos 3D y el Punto de Control no superan los 0,0512 m de error ya sea en X, Y o Z, tanto en los puntos 3D como en el punto de control; se debe considerar además que la media de X, Y, Z de los puntos 3D su precisión es de milímetros. Lo mismo ocurre con Sigma y el RMS, haciéndole a éste un modelo muy preciso si lo comparamos con los otros dos modelos realizados. Se realizó el mismo ejercicio que en los dos modelos anteriores, y se cotejó en un mapa la precisión entre los GCPs post-procesados y el ortofotomosaico procesado con los mismos GCPs, los resultados se muestran en el Anexo 9.

### 3.2.4 Modelo 4: Calibración de la Ortofoto con GCP's post-procesados por programa GNSS Solutions con 4 GCP.

Para guardar rigor estadístico comparativo, se construyó este modelo, utilizando 4 de los 6 GCP post-procesados con el programa GNSS Solutions, siendo estos; P3, P4 y P6, como puntos 3D, y como punto de control (Check Point) P5. Los resultados del modelo 4 fueron extraídos del Reporte de Calidad.

Si el Punto de Control (Check Point) P5 en el Anexo 10, se observa que los valores en Y y Z superan los límites exigidos por el IGM (2008). Por tanto el modelo 4 se descarta, y el modelo 3 se considera como el mejor producto de la presente investigación.

Al igual que los modelos anteriores, se colocan los 4 CGP en el ortofotomosaico calibrado por estos mismos puntos. (Anexo 11) Como se observa en la figura los puntos con mayor desplazamiento son P4 y P5.

### 3.2.5 Comparación visual entre Modelos.

Al comparar el Modelo 3 (colores reales), con el Modelo 1 (colores en negativo), se puede observar que en modelo 1 existe un desplazamiento de aproximadamente 0,90 m hacia el oeste; esto medido con la herramienta Measure del programa Arcgis 10.2 (Figura 7)



Figura 7. Comparación de precisiones entre Modelo 3 (más preciso) con Modelo 1.

De igual forma se realizó la comparación del Modelo 3 (colores reales) con el Modelo 2 (colores en negativo), y se pudo observar y medir que existe un desplazamiento de aproximadamente 0,10 m hacia el oeste, esto medido con la herramienta Measure del programa Arcgis 10.2. La Figura 8 muestra el desplazamiento que es casi imperceptible.

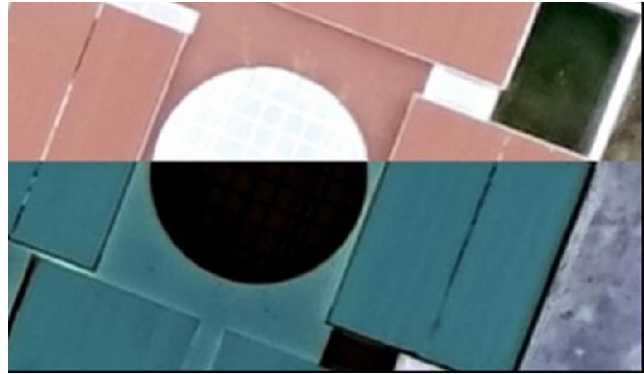


Figura 8. Comparación de precisiones entre Modelo 3 (más preciso) con Modelo 2

En la Figura 9, al igual que los casos anteriores, se compara el Modelo 3 (más preciso, de colores reales) con el Modelo 4 (colores azulados), y se puede observar que existe un desplazamiento del Modelo 4 de 0,40 m al oeste; esto medido con la herramienta Measure del programa Arcgis 10.2



Figura 9. Comparación de precisiones entre Modelo 3 (más preciso) con Modelo 4

### 3.2.6 Comparación visual con ortofoto del proyecto SIGTIERRAS.

Aunque las escalas son diferentes, puesto que la ortofoto del SIGTIERRAS presenta una espacial a 1:5.000 (30 cm tamaño de pixel) y su toma esta dada entre los años 2009 y 2010, en tanto que el ortofotomosaico está a escala 1:1.000 (10 cm tamaño de pixel) para 2016; pero se puede, de cierta manera visualizar si existe variación posicional o de precisión entre los dos productos.

Como se puede observar en la Figura 10, el ortofotomosaico generado en la presente investigación (parte inferior, colores vivos) y la ortofoto del proyecto SIGTIERRAS (parte superior colores pálidos); prácticamente no presentan diferencias en su precisión, ya que existen coincidencias con vías, viviendas, linderos, entre otras, las diferencia no se pudieron medir claramente por la diferencia en el tamaño del pixel, pero se calcula que están alrededor de 0,01 m; esto medido con la herramienta Measure del programa Arcgis 10.2



Figura 10. Comparación visual de precisión entre ortofoto del SIGTIERRAS y el Ortofotomosaico de la presente investigación

**3.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DE LOS MODELOS OBTENIDOS CON LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL IGM.**

Para este acápite, se tomaran en cuenta algunas especificaciones técnicas dadas por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador, que permitirá convalidar los resultados obtenidos en la presente investigación.

**3.3.1 Con las Especificaciones técnicas Generales para la realización de Cartografía Topográfica a Cualquier Escala (Primer Borrador) año 2006.**

En este documento se describen las especificaciones técnicas para el vuelo y toma de fotografía aérea para aviones tripulados, a continuación en la Tabla III, se coloca una lista de cumplimiento de los procesos descritos por el IGM (2006).

Como se puede observar en la Tabla III, se cumple la mayoría de requerimientos técnicos observados en este documento; se supera en el traslape longitudinal y lateral; pero no se cumple con el tiempo de lectura del DGPS, ya que para esa época, los equipos tenían menor tecnología y la REGME no estaba tan densificada. Al consultar con los técnicos del IGM, ellos mencionaron que para la distancia (28,7 km) de donde está el sitio de estudio a la estación CUEC, solo eran necesarios 30 min de lectura. (Yépez, com. per., 2016)

Existen otros parámetros y condicionantes que no fueron observados en este documento, ya que en el mismo mencionan y características propias de vuelos tripulados con cámaras analógicas para fotografía aérea

**3.3.2 Con las Especificaciones técnicas para Ortofotos Digitales (Primer Borrador) año 2008.**

Este documento producido por el IGM (2008), detalla las especificaciones técnicas para la obtención de ortofotos y ortofotomosaicos, tomando en cuenta los pasos necesarios para asegurar que los productos cumplan con los parámetros de exactitud.

Se hace mención a la necesidad de tomar puntos de control para la calibración del modelo resultante; además aluden a las correcciones de deformidad (paralelaje) de las fotos, y de cómo escoger el mejor método para este procedimiento. Además mencionan que se deben realizar correcciones radiométricas para la estandarización del color y la brillantez de la ortofoto.

Mencionan además, que las ortofotos deben contener continuidad o traslape adecuado, y que este va a depender de las características del terreno.

**TABLA III.**

LISTA DE COMPROBACIÓN DE ACTIVIDADES A REALIZAR PARA LA TOMA DE FOTOGRAFÍA AÉREA.

Condiciones de Vuelo	IGM	Investigador
<i>LÍNEAS DE VUELO</i>		
Fotografías Sucesivas ángulo no mayor a 5°		Cumple
Líneas de vuelo paralelas Angulo no mayor a 5°		Cumple
<i>RECUBRIMIENTO</i>		
Terreno Plano 60% traslapo longitudinal		75% (Supera)
Terreno Plano 60% traslapo lateral		75% (Supera)
<i>CONDICIONES METEOROLÓGICAS</i>		
Cielos despejados, sin nubes, suelo sin bruma		Cumple
<i>CONDICIONES DE CAMARA FOTOGRAFÉTRICA</i>		
Cámara de precisión de buena resolución espacial (tamaño de pixel)		Cumple
		Cumple
Gráficos de Vuelo (líneas de plan de vuelo)		Cumple
<i>SISTEMAS DE NAVEGACIÓN CINEMÁTICOS</i>		
Plan de Vuelo		Cumple
Correcciones de datos de DGPS		Cumple
Metadatos indicando sistema de coordenadas		Cumple
SIRGAS /WGS84		Cumple
<i>TRABAJOS DE APOYO</i>		
Al menos 2 DGPS L1 o L1/L2		DGPS L1
GPS dentro del avión		Cumple
Uso de la REGME para post-proceso		Cumple
Tiempo de Lectura de DGPS por punto (70 min)		30 min
<i>CONDICIONES DE LOS PUNTOS DE APOYO</i>		
Calibrados por datos de alguna estación REGME		Cumple

Algo que deja muy claro este documento es que la exactitud horizontal de la ortofoto u ortofotomosaico, depende de la calibración de la cámara y la exactitud de los puntos de control que deben estar calculados con un intervalo de confianza del 95%.

Además indica las especificaciones técnicas de exactitud para ortofotos digitales, misma Figura 16 que a continuación se detalla.

ESCALA DE LA FOTOGRAFÍA	TAMAÑO DEL PIXEL (EN METROS)	ESCALA DE ORTOFOTOS	TAMAÑO DEL PIXEL (EN METROS)	PRECISIÓN HORIZONTAL (EN METROS)	PRECISIÓN VERTICAL (EN METROS)
1:5 000	0.07	1:1 000	0.10	0.30	0.25
1:10 000	0.14	1:2 000	0.20	0.60	0.50
1:20 000	0.28	1:2 500	0.25	0.80	0.60
1:30 000	0.42	1:5 000	0.50	1.50	1.25
1:60 000	0.84	1:10 000	1.00	3.00	2.50
1:60 000	0.84	1:20 000	1.00	6.00	2.50
1:60 000	0.84	1:25 000	1.00	7.50	5.00
1:60 000	0.84	1:50 000	2.00	15.00	10.00

Figura 11. Especificaciones Técnicas para Ortofotos Digitales

Como se puede observar en la Figura 16, las especificaciones técnicas para la precisión horizontal (X, Y) es de 0,30 m; en tanto que para la presión vertical es de 0,25 m, tomando en cuenta un tamaño de pixel de 10 cm.

Tomando en cuenta estas especificaciones técnicas, y considerando sus precisiones tanto horizontal como vertical, el Modelo 1 no calificaría dentro de los parámetros exigidos por el IGM, en tanto que el Modelo 2 por la media en los Puntos de Control no califica solo en la precisión vertical, al igual que el Modelo 4.

Al revisar el Modelo 3, y fijarse en la media del Punto de Control (check point) de sus coordenadas X, Y, Z; éstas cumplen por un amplio margen la precisión establecida por el IGM en sus especificaciones técnicas.

Si se quiere ser más rígido y analizar los datos del Modelo 3, sumándole el error residual del post-procesamiento de los GCP y los del post-proceso del ortofotomosaico, se tendría:

**TABLA IV.**  
SUMATORIA DE ERRORES DE POST-PROCESAMIENTO DE DATOS PARA MODELO 3.

Errores	X	Y	Z
Error Post-proceso GCP (m)	0,017	0,035	0,039
Error Post-proceso Ortofoto (m)	-0,0387	0,0512	0,0075
<b>Sumatoria</b>	<b>-0,0217</b>	<b>0,0862</b>	<b>0,0465</b>

Como se puede apreciar en la Tabla IV, si se suman los dos errores del post-procesamiento ésta sigue cubriendo con amplio margen el requerimiento planteado por el IGM en sus especificaciones técnicas.

Cabe mencionar que el sitio de estudio es un área de poco relieve, puesto que en general la ciudad de Paute no presenta cambios abruptos de pendiente. En caso de que se desarrollase una investigación en una zona urbana o de expansión que presente pendientes pronunciadas (mucho relieve) se debe considerar que las lonas de las marcas de suelo o tierra deben ser colocadas en sitios en los cuales las mismas no queden inclinadas en dirección de la pendiente, ya que esto podría generar dificultades en el momento de las calibraciones manuales de las fotografías en los software especializados, por lo que se debería procurar colocar estas marcas en zonas planas tales como veredas o vías ubicadas en cimas de las colinas, en cajas de control de alcantarillado, canchas deportivas, parques, plazoletas, entre otros. Por lo demás las consideraciones para mantener precisiones dentro de las Normas IGM se basan en la adecuada medición de los GCP o red geodésica de 4to orden.

#### AGRADECIMIENTOS

Hay muchas personas e instituciones que debo agradecer, entre estas: Omar Delgado por ser un verdadero maestro y guía, quien supo formarme en el tema de Geomática; a la empresa INSIGMA Cia Ltda, A la empresa DRONEXT Cia Ltda, en especial a Diego Ríos y Lisseth Cure, quienes confiaron en mí para la ejecución de esta investigación. Además debo agradecer a Diego Pacheco, Paul Ochoa, y Chester Sellers que con sus valiosos consejos supieron mejorar la presente investigación.

#### REFERENCIAS

- Coello, A. Ballesteros, G. 2015. Fotogrametría de UAV de ala fija y comparación con Topografía clásica. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Técnicos en Topografía, Geodesia y Cartografía. Universidad politécnica de Madrid.
- Cuerno, C. 2015. Cap. 1. Origen y desarrollo de los Sistemas de Aeronaves Pilotadas por Control Remoto. Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil. Graficas Arias Montano. Madrid - España.
- Delgado, O. 2016. Comunicación Personal en Reunión de Trabajo.
- Drewes, H. 2014. Sistemas de Referencia. Sistema de Referencia Geocéntrico de las Américas SIRGAS - Instituto Geográfico Militar (www.igm.gob.ec). Quito - Ecuador.

#### IV. CONCLUSIONES

Luego del análisis y discusión de los resultados, tanto de campo como de laboratorio y la relación entre éstos se pueden sacar las siguientes conclusiones principales.

- La base para la precisión del ortofotomosaico y demás productos fruto del levantamiento con el UAV/Drone, es el diseño y medición de la red geodésica de 4to orden o GCPs; debido a que estas actividades proporcionan los datos iniciales de los cuales la investigación se basa y fundamenta sus precisiones; una red adecuadamente medida, siguiendo las recomendaciones técnicas dadas por el IGM en sus diferentes publicaciones, asegura que los resultados sean los más precisos. Para la presente investigación se diseñó y midió la red geodésica de 4to orden de manera adecuada, y fruto de eso se pudo obtener un modelo con exactitudes que entran dentro de los parámetros del IGM. Es recomendable densificar más la red geodésica de 4to orden o GCP para que, si existen puntos que no están bien medidos, existan más puntos que puedan ser auxiliares de la medición.
- Otra conclusión importante que se debe tomar en cuenta, es el trabajar con programas especializados y actualizados para las tareas de post-procesamiento, porque de estos programas también dependen que los datos levantados o medidos en campo cumplan con los estándares adecuados de precisión. Por eso al comparar los productos del post-procesamiento entre el programa GNSS Solutions (año de producción 2005) con el programa Trimble Business Center v3.4 (año de producción 2014), los resultados de este último son los más precisos.
- Se concluye que el Modelo 3 post-procesado con 4 GCPs (en Trimble Business Center), fue el modelo que mayor precisión presenta comparándole con los modelos 1, 2 y 4; ya que excluyó del análisis a los puntos P1 y P2 que mayor ruido en la medición tuvieron, dando un modelo de centímetros de precisión.
- Una de las conclusiones más importantes de esta investigación es que los productos generados por el UAV/Drone, cumplen con las especificaciones técnicas de precisión, tanto horizontal y vertical dados en los documentos técnicos del IGM; si bien es cierto no se pueden seguir todo el proceso metodológico por ellos emitido (ya que es para fotografía aérea tomada con aviones tripulados), se realizó lo más similar posible, y los resultados fueron exitosos. Comprobando la hipótesis planteada en la presente investigación.

Emotion 2 Manual. 2015. Extended user manual eBee and eBee Ag. Sensefly Ltd.

Cheseaux-Lausanne - Switzerland. 176 pag. GNSS Solutions, 2005. User Manual. Trimble Navigation Solutions. www.spectraprecisions.com

Haluani, M. 2014. La tecnología aviónica militar en los conflictos asimétricos: historia, tipos y funciones de los drones letales. Revista Cuestiones políticas Vol. 30 No 52. Maracaibo - Venezuela

IGM, 2006. Especificaciones Técnicas Generales para la realización de Cartografía Topográfica a cualquier Escala (Primer Borrador). Sin publicación. www.igm.gob.ec

IGM, 2008. Especificaciones Técnicas para Ortofotos Digitales (Primer Borrador) Sin Publicación. www.igm.gob.ec

IGM, 2014. REGME: Red GNSS de Monitoreo Continuo del Ecuador Formulario Informativo Estación de Monitoreo Continuo Cuenca - CUEC. www.igm.gob.ec

INEC, 2011. División político Administrativa del Ecuador. Base de Datos Nacional. Quality Report, 2016. Reporte de Calidad de Pix4DMapper para Modelo 1, 2 y 3 Generados. Sin Publicación

Pachas, R. 2009. El levantamiento Topográfico: Uso del GPS y Estación Total. Laboratorio de Topografía. Departamento de ingeniería. Núcleo Universitario Raquel Rangel. Universidad de los Andes. Trujillo - Venezuela.

Paredes, D y Noguera, A. 2015. Cap. 5. Aplicaciones Cartográficas de los UAV's. Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil. Graficas Arias Montano. Madrid - España.

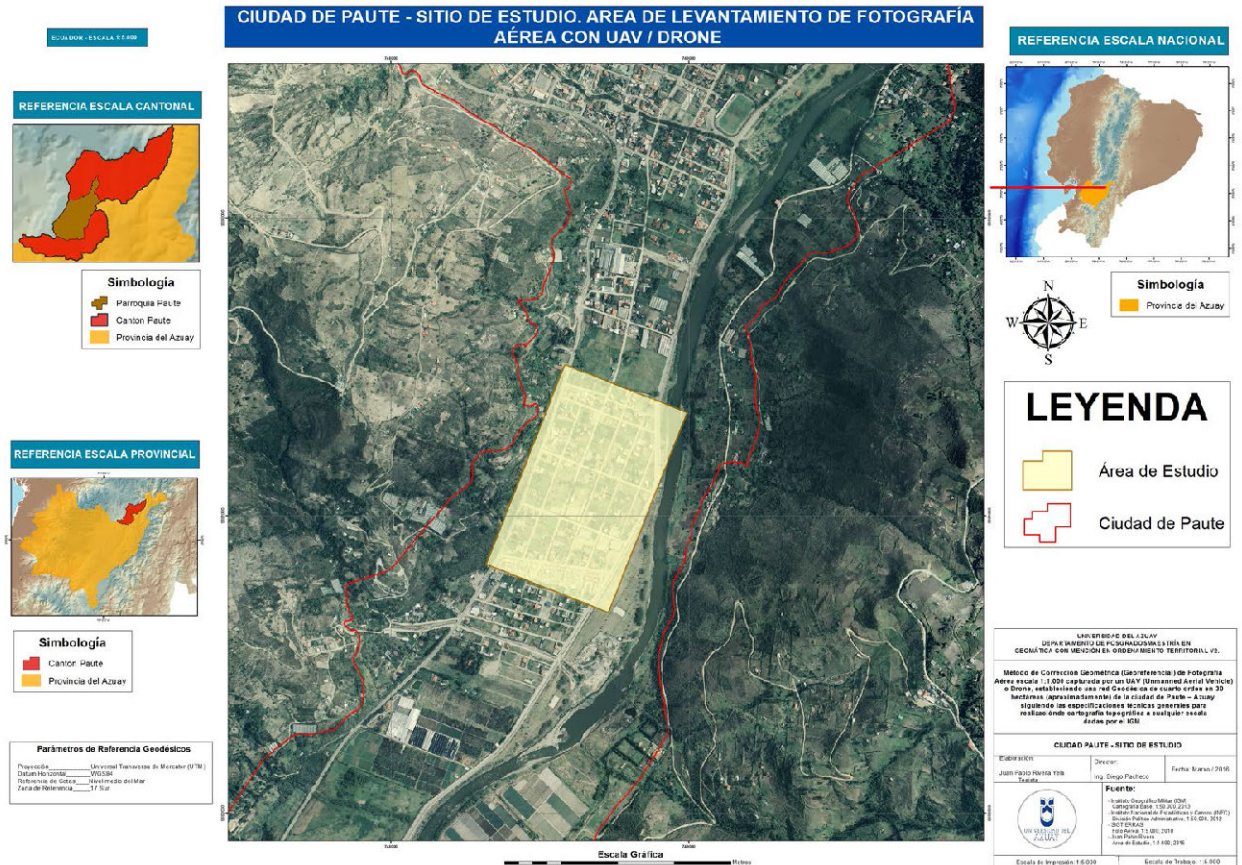
Pix4DMapper, 2016. Manual del Usuario y procedimientos. https://support.pix4d.com

TBC (Trimble Business Center v2.4), 2014 Manual para post-procesamiento de datos de campo. Trimble Navigation Solutions. www.trimble.com

Velasco, J. García-Nieto, S. Reynoso-Meza, G. y J. Sanchis. 2012. Desarrollo y Evaluación de una estación de control de tierra para Vehículos aéreos no tripulados. Universitat Politècnica de Valencia. Valencia - España.

Yépez. 2016. Técnico del Instituto Geográfico Militar Comunicación Personal por medio de conferencia telefónica.

Anexo 1





Anexo 4

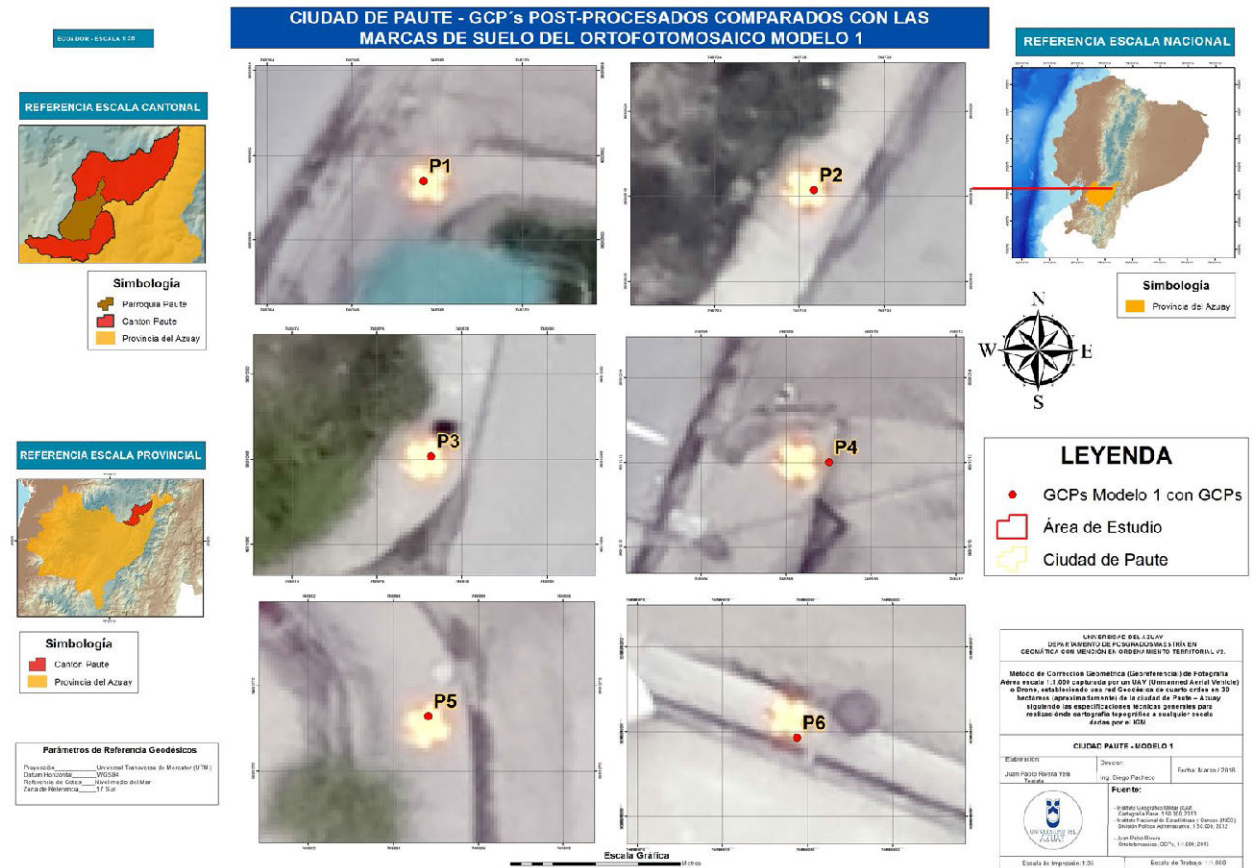
Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P1 (3D)	0.020/ 0.020	-0.136	0.067	0.164	0.627	4 / 4
P2 (3D)	0.020/ 0.020	0.124	-0.025	-0.008	0.475	3 / 3
P5 (3D)	0.020/ 0.020	-0.066	0.146	-0.462	1.342	3 / 3
P6 (3D)	0.020/ 0.020	0.184	-0.437	-0.216	0.521	2 / 2
Mean [m]		0.026529	-0.062342	-0.130296		
Sigma [m]		0.131543	0.224604	0.234035		
RMS Error [m]		0.134191	0.233096	0.267861		

0 out of 2 check pointss have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P3	0.0200/0.0200	0.0697	0.1018	-0.8290	0.1319	2 / 2
P4	0.0200/0.0200	0.6916	-0.0077	-0.5411	0.0141	2 / 2
Mean [m]		0.380638	0.047048	-0.685083		
Sigma [m]		0.310933	0.054785	0.143966		
RMS Error [m]		0.491492	0.072214	0.700046		

Anexo 5



## Anexo 6

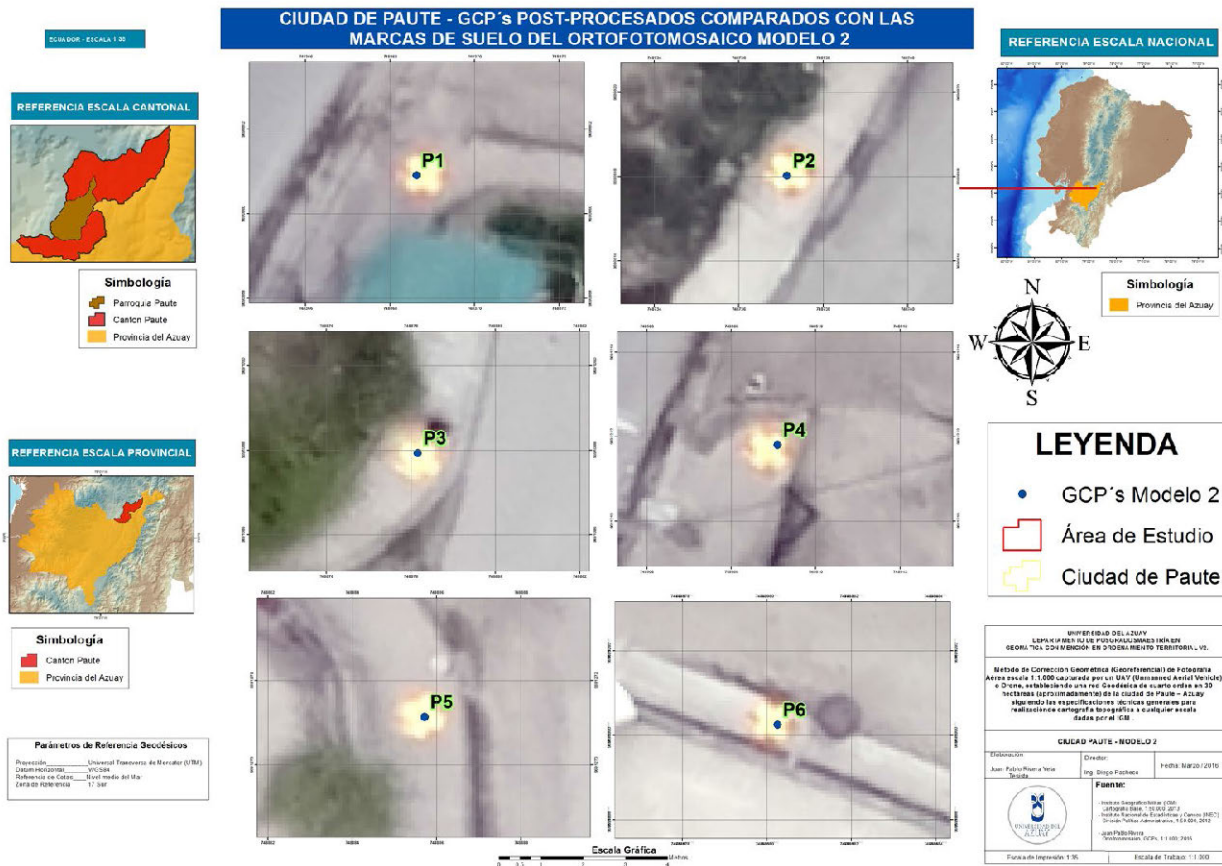
### Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P1 (3D)	0.020/0.020	-0.170	-0.014	0.980	0.602	4 / 4
P2 (3D)	0.020/0.020	-0.078	0.039	0.675	0.744	5 / 5
P6 (3D)	0.020/0.020	-0.065	-0.088	-1.879	0.408	4 / 4
<b>Mean [m]</b>		-0.104444	-0.021077	-0.074747		
<b>Sigma [m]</b>		0.046572	0.051862	1.282110		
<b>RMS Error [m]</b>		0.114357	0.055981	1.284287		

0 out of 2 check pointss have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P3	0.0200/0.0200	-0.1315	0.1956	-0.9574	2.7377	13 / 13
P4	0.0200/0.0200	0.0712	0.0252	-0.9888	1.2913	4 / 4
<b>Mean [m]</b>		-0.030129	0.110368	-0.973110		
<b>Sigma [m]</b>		0.101334	0.085189	0.015675		
<b>RMS Error [m]</b>		0.105718	0.139422	0.973236		

## Anexo 7





Anexo 8

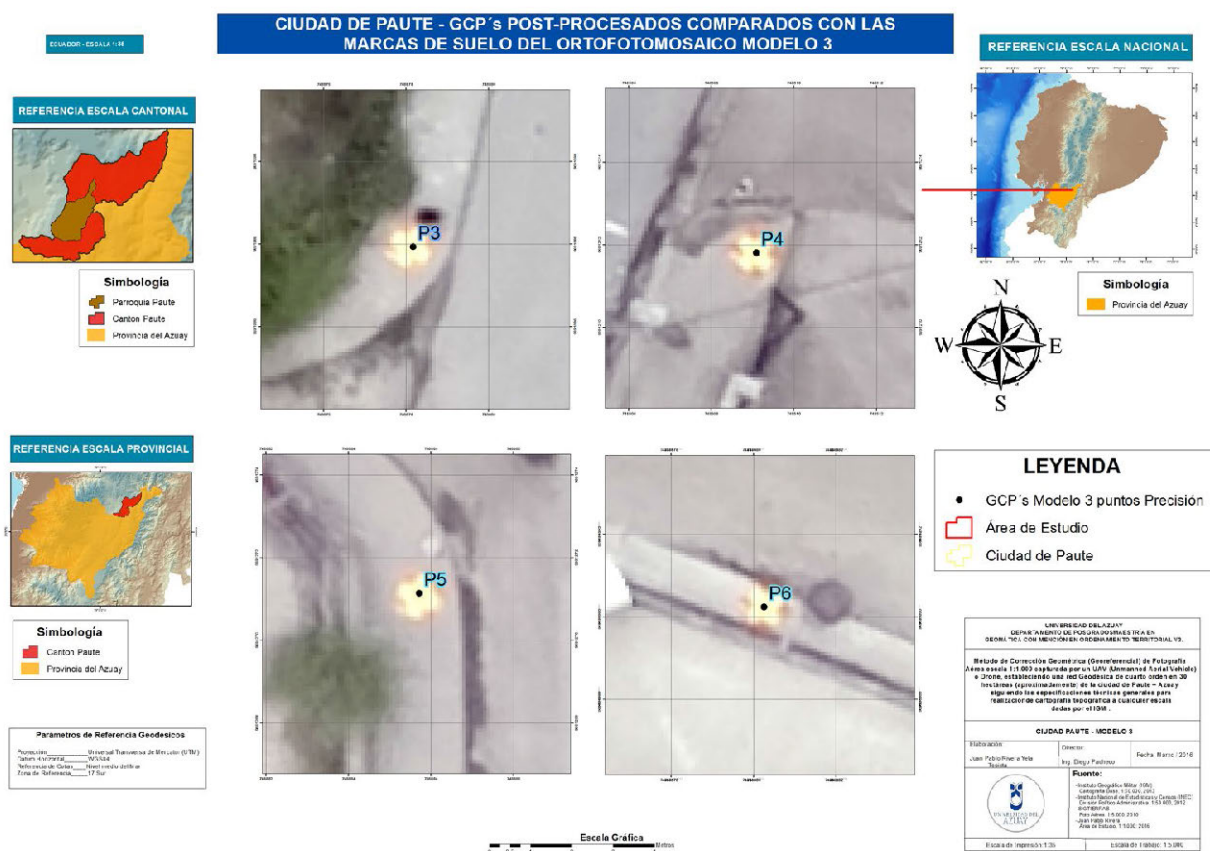
Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P3 (3D)	0.020/ 0.020	-0.001	-0.008	0.006	0.312	3 / 3
P4 (3D)	0.020/ 0.020	0.010	0.001	0.026	0.749	4 / 4
P6 (3D)	0.020/ 0.020	-0.013	0.006	-0.042	0.388	3 / 3
<b>Mean [m]</b>		-0.001215	-0.000487	-0.003284		
<b>Sigma [m]</b>		0.009129	0.005540	0.028258		
<b>RMS Error [m]</b>		0.009210	0.005561	0.028448		

0 out of 1 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P5	0.0200/0.0200	-0.0367	0.0512	0.0075	0.0531	2 / 2

Anexo 9



Anexo 10

Ground Control Points

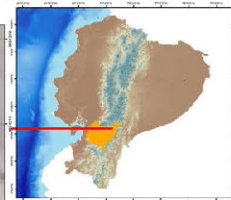
GCP Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P3 (3D)	0.020/ 0.020	0.022	-0.049	-0.007	0.318	3 / 3
P4 (3D)	0.020/ 0.020	0.089	0.101	-0.173	0.634	3 / 3
P6 (3D)	0.020/ 0.020	-0.248	-0.094	-1.624	0.247	2 / 2
<b>Mean [m]</b>		-0.045959	-0.013932	-0.601112		
<b>Sigma [m]</b>		0.145737	0.083287	0.726219		
<b>RMS Error [m]</b>		0.152812	0.084444	0.942725		

0 out of 1 check points have been labeled as inaccurate.

Check Point Name	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
P5	0.0200/0.0200	-0.0635	0.3296	-2.7153	0.5707	3 / 3

**CIUDAD DE PAUTE - GCP's POST-PROCESADOS COMPARADOS CON LAS MARCAS DE SUELO DEL ORTOFOTOMOSAICO MODELO 4**

**REFERENCIA ESCALA NACIONAL**



**Simbología**  
 Provincia de Azuay



**LEYENDA**

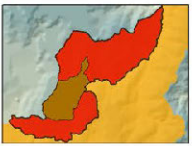
- GCPs Modelo 4
- Área de Estudio
- Ciudad de Paute

UNIVERSIDAD DEL AZUAY  
 DEPARTAMENTO DE FUNDACIONES Y SISTEMAS DE  
 GEOMÁTICA CON MÉRITOS EN ORDENAMIENTO TERRITORIAL 12

Método de Corrección Geométrica (Escalamiento) de Fotografía Aérea Escala 1:40000000 por GPS. Controlados por el INEGI y el IGN, se realizó una red de vértices de control en 55 puntos distribuidos en la ciudad de Paute - Azuay, siguiendo las especificaciones técnicas para una metodología cartográfica oportuna e íntegra por el INEGI.

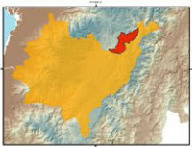
CIUDAD PAUTE - MODELO 4		
ELABORADOR:	Fecha:	Paute, Azuay - 2016
Juan Pablo Rivera Yera	Ing. 2016/Paute/Azuay	
<b>Puede:</b>		
Sección de Geografía y Estadística Calle 10 de Agosto 1000 01000 Paute - Azuay Teléfono: 076 222 2222 Correo electrónico: geografia@uniaz.edu.ec geografia@uniaz.edu.ec		
Logo of Universidad del Azuay		
Escala de 1:8000 1:1000		

**REFERENCIA ESCALA CANTONAL**



**Simbología**  
 Parroquia Paute  
 Canton Paute  
 Provincia de Azuay

**REFERENCIA ESCALA PROVINCIAL**



**Simbología**  
 Canton Paute  
 Provincia de Azuay

**Parámetros de Referencia Geodésicos**  
 Proyección: Universal Transversa de Mercator (UTM)  
 Datum: Ecuador 1955  
 Referencia de Datos: Base: censo de 1990  
 Zona de Referencia: 17 East



# Georreferenciación de mapas históricos de Sudamérica para el desarrollo de una galería de mapas web

Diego F. Reyes Yunga<sup>1</sup>, Paola A. Salgado Chavez<sup>2</sup>, Oswaldo Padilla<sup>3</sup>

1, 2,3 Departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción-Grupo Geoespacial, /Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente/ Universidad De Las Fuerzas Armadas- ESPE, Sangolquí/ Pichincha/ Ecuador

1 dfreyes2@espe.edu.ec  
2 pasalgado@espe.edu.ec  
3 ovpadilla@espe.edu.ec

## RESUMEN

En los últimos años la información geográfica de libre acceso ha ido en aumento, la mayor parte de esta información cumple con los estándares actuales, sin embargo, no se adapta a los mapas históricos, motivo por el cual surge la iniciativa del presente proyecto para identificar cuan bien ajustada está la cartografía histórica en relación a la actual. Para esto fueron empleados 24 documentos cartográficos liberados en la web y correspondientes a la galería de David Rumsey de los mapas representativos de Sudamérica como caso particular, adicionalmente se geo-referenció las imágenes obteniendo así los valores de error cuadrático medio, los cuales están en función de la distribución y selección de los puntos control homólogos, los valores de máxima y mínima deformación que son directamente proporcionales al transcurso de los años. Sin desestimar la elaboración de la cartografía histórica que es completamente un trabajo de precisión, detalle y una obra arte se debe reconocer el ingenio de los autores para obtener esta información sin las herramientas tecnológicas se dispone actualmente que permiten alcanzar mejor precisión y ajuste óptimos a los estándares legislativos propios de cada sector. Finalmente, bajo el concepto de la difusión de la información se empleó la plataforma de Story Map para la publicación de la cartografía histórica geo-referenciada.

Palabras claves: **Cartografía histórica, geo-referenciación, error cuadrático medio, Sudamérica.**

## ABSTRACT

*In recent years, free geographical information has been increasing, most of this information meets current standards, however it is not adapted to historical maps, which is why the initiative of this project arises to identify how well adjusted is the historical cartography in relation to the current one. For this purpose, 24 cartographic documents released on the web and corresponding to the David Rumsey gallery of the representative maps of South America as a particular case, were additionally geo-referenced the images obtaining the mean square error values, which are in function of the distribution and selection of homologous control points, the values of maximum and minimum deformation that are directly proportional to the course of the years. Without underestimating the elaboration of historical cartography which is completely a work of precision, detail and a work of art must recognize the ingenuity of the authors to obtain this information without the tech-*

nological tools are currently available that allow to achieve better accuracy and optimal adjustment to the Legislative standards of each sector. Finally, under the concept of the dissemination of information, the Story Map platform was used for the publication of geo-referenced historical cartography.

**Key Words: Historical Cartography, Geo-referencing, Medium Square Error, South America.**

## I. INTRODUCCIÓN

Desde que el hombre pasó de ser nómada a sedentario ya hace 13000 y 5000 años atrás y que se agrupó en diferentes comunidades, surgen los modos de producción y con ello el concepto de propiedad privada donde cada una de las civilizaciones, colonias, estados, países y divisiones políticas han procurado responder una serie de interrogantes como: ¿Dónde estamos ubicados con respecto al mundo?, ¿Cuál es nuestra extensión y límite territorial?, ¿Quiénes nos rodean y en dónde están?, ¿Qué poseemos y en dónde localizarlo?, ¿Cuál es la ruta a seguir? y ¿Cómo puedo representar esta información?, estas y muchas más son las cuestionamientos que por política, estrategia militar y comercio han sido resueltos por medio de la cartografía a través de la elaboración de mapas. (Acero, 2017); (Gente Digital, 2010)

Actualmente las mismas interrogantes siguen siendo una constante necesidad de ser respondidas y actualizadas debido al dinamismo humano, geodinámica de la tierra, estructura y marco legislativa, estándares, temática y tiempo, es por ello que la cartografía ha tenido un constante desarrollo basado en los nuevos modelos matemáticos, tecnología geo-espaciales y desarrollo de software que han facilitado su elaboración, recopilación y difusión de mapas con temáticas infinitas.

El concepto de cartografía según definido por la Asociación Cartográfica Internacional( IAC) define a la cartografía como la disciplina que trata sobre la concepción, producción, difusión y estudio de los mapas, la representación cartográfica histórica esta justamente relacionado a la concepción de la forma tierra, superficie de referencia y sistema de proyección a utilizarse es por ello que la inserción de nuevos descubrimientos tecnológicos y desarrollos matemáticos que han marcado etapas en la generación de la misma. (ICA, 1995)

La democratización de la información es una de las acciones que han facilitado la recopilación y difusión de la información ya sea esta por medios físicos o digitales un claro ejemplo es la un ejemplo de ello es la información en línea de mapas históricos de David Rumsey el cual es la fuente principal de obtención de mapas históricos para el desarrollo del proyecto propuesto. (Sánchez, 2008) , (humanrightsaction, 2003); (Rumsey, 2017)

Es así que los mapas históricos recopilados para dicha investigación se encuentran dentro del periodo de 1597 hasta el 1967, donde algunos de los países actuales eran parte de las diferentes colonias y otros se encontraban como estados independientes; el topónimo principal que representaba a estos mapas era Mapa de Perú, el cual abarcaba un conjunto de países de Sudamérica que actualmente se conoce. La información fuente que acompaña a estos mapas son: el año, autor, los países que representa y una breve reseña del mismo. (Instituto Cervantes , 2014)

Tomando en consideración el avance tecnológico y desarrollo en las ciencias geo-espaciales la presente investigación tiene por objeto determinar el grado de precisión con la que elaborados estos mapas mediante la georreferenciación a un sistema cartográfico con el uso de herramientas de Sistemas

de Información Geográfica (SIG), aplicaciones Web para la divulgación de la información y cartografía oficial todo ello con la finalidad de determinar cuán bien ajustados están estos mapas con sus elementos representados en la actualidad y aplicando el cálculo del Error Cuadrático Medio( ECM ).

## II. METODOLOGÍA

### II.I. RECOPILAR INFORMACIÓN FUENTE

#### II.I.I. Buscar página fuente

Se seleccionó como fuente de obtención los mapas pertenecientes a la colección de David Rumsey encontrados en la página David Rumsey Map Collection en el link [www.davidrumsey.com](http://www.davidrumsey.com) , por la variedad de mapas que esta página presenta y las opciones de descarga en diferentes resoluciones.

### II.II. RECOPIRAR MAPAS HISTÓRICOS

Se inició la selección y descarga de la cartografía histórica disponible y representativa de Sudamérica que datan desde 1597 hasta 1967 en la más alta resolución (figura 1).



Figura 1. Galería online-David Rumsey Map Collection  
Fuente: (Rumsey, 2017)

### II.II. RECTIFICACIÓN DE IMÁGENES

#### II.II.I. Geo-referenciación

Para la georeferenciación se utilizó el software ArcGis y de este el módulo ArcMap donde se subió el shape de Sudamérica como documento de referencia y las imágenes descargadas como documentos a referenciar, la proyección cartográfica utilizada fue Universal Transversa Mercator (UTM) en el sistema WGS 84. (figura 2).

La distribución de los puntos de control se distribuyó en su mayoría en torno al perfil continental y a los elementos representados tanto en la cartografía histórica como en la actual (figura 3).



Figura 2. Shape oficial de Sudamérica  
Fuente: (ESRI, 2015)

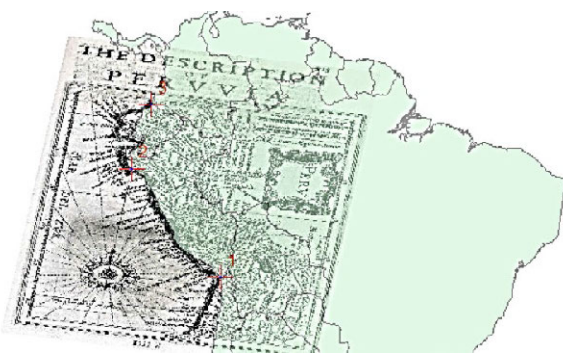


Figura 3. Colocación de puntos de control  
Fuente: Elaboración Propia

II.II. II. Transformación a fín

Esta transformación afín también llamada afinidad es parte de la rectificación de la imagen y se hace entre dos espacios afines (figura 4) en este caso la imagen y el shape de Sudamérica y consiste en una transformación lineal seguida de una traslación, la misma que se almacena en una matriz dada por la ecuación [1] elaborada automáticamente en el ArcMap, la misma que va calculando el error cuadrático medio que se genera entre el mapa y shape (figura 5).

$$x' = Ax + By + cy' = Dx + Ey + F \tag{1}$$

Donde x e y son las coordenadas de la capa de entrada y x' e y' son las coordenadas transformadas. A,B,C,D,E,F se determinan comparando la ubicación de los puntos de control de origen y destino. Escalan, sesgan, rotan y traducen las coordenadas de la capa. Este método requiere un mínimo de tres vínculos. Es la opción recomendada para la mayoría de las transformaciones. (ESRI, 2016)



Figura 4. Espacios afines (shape e imagen)  
Fuente: Elaboración Propia

Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	Residual
4252	1640537.361068	7937865.104739	47815.4	115889	125566
4801	1320721.306595	8136573.204237	105330	87811.8	135231
9888	479809.759131	9325463.944329	22728.2	33102.5	40362.3
15200	669440.276404	9151575.490103	24067.6	87095.8	90560
20489	4923122.058739	9665911.590118	-69811.9	112338	132283
27061	5488561.456098	8063310.420226	184999	24711.1	186146
71451	1397367.431777	8605532.572573	-24287.6	-4152.73	29640
77913	1544313.341188	7130487.204644	512.72	-112573	112574
86905	919226.981997	8674368.833894	43731.3	57844.7	72815.1
83604	4193300.558746	5754591.847997	-15198	-278074	278529
88177	1091089.637086	8340322.062570	7552.62	161123	161300
83341	1127306.312517	8293216.482674	13435.5	86688	87723
77653	1003852.026692	8155112.572646	62378.8	88521.2	108291

Figura 5. Matriz de transformación afín y visualización de error cuadrático medio  
Fuente: Elaboración Propia

II.II.III. Formato salida

Finalmente se estableció un formato de salida con características como: una cuadrícula de la proyección, shape de Sudamérica sobrepuesto y como fondo la imagen del mapa rectificad, el nombre del mapa con su respectivo año de elaboración, escala gráfica y el membrete con los respectivos autores, sistema de proyección, la fecha de elaboración y fuente. (figura 6)



Figura 6. Formato para imágenes rectificadas de mapas  
Fuente: Elaboración Propia

II.III. DIFUSIÓN DE LA CARTOGRAFÍA HISTÓRICA REFERENCIADA

Dada la importancia de la difusión de los resultados obtenidos, se encontró oportuno publicarlos a través de la web, encontrándose con la facilidad que brinda un Story Map el cual permite divulgar información geográfica, multimedia y temática, para ello se procedió a:

II.III. I. Crear una cuenta de Story Maps

Ingresa al link oficial de Story Map <https://storymaps.arcgis.com/es/#> donde se registra una cuenta de carácter gratuito, el mismo que permite tener acceso a la aplicación que este nos ofrece.

II.III.II. Elegir temática y formato de visualización

Para ello se seleccionó un Story Map de tipo Journal el mismo que permite la visualización de una línea de tiempo y adjunta

características comparativas entre el mapa original y el rectificado, el cual se ajusta a la presentación de la información del presente proyecto.

### II.III.III. Publicación de la información

Para ello se utilizaron las imágenes con el formato de salida preestablecido, e imágenes de mapas históricos recopilados.

Primero subir las imágenes generadas

Añadir el texto explicativo en función a nombre del mapa, información fuente y análisis de resultados obtenidos.

Posteriormente edición visual (figura 7).

Finalmente, publicación en la web.



Figura 7. Visualización de mapas y características  
Fuente: Elaboración Propia

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se obtuvieron 24 mapas históricos geo-referenciados en el sistema de proyección cartográfica UTM con un ECM máximo de 172981 m<sup>2</sup> para el mapa de Perú de 1597 (figura 9-anexos) y con un mínimo de 7386.15 m<sup>2</sup> para el mapa de Perú de 1997 (figura 12-anexos) como se ve en la Tabla I de ECM Mapas Histórico, la media del ECM es de 53352.18 m<sup>2</sup>

Como producto entregable y con el criterio de la democratización de la información se desarrolló un Story Map con el nombre Galería de mapas históricos de Sudamérica el cual presenta a cada uno de los mapas geo-referenciados sobre la cartografía oficiales, (figura 8); (figura 10 y 12- anexos).

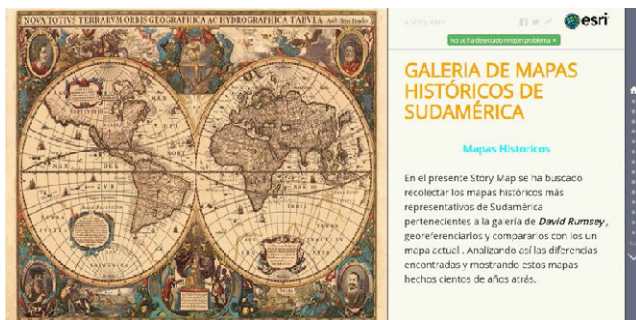


Figura 8. Portada Story Map  
Fuente: Elaboración Propia

Como resultado del desarrollo del proyecto y de la geo-referenciación de esta cartografía histórica se plantea incursar en un segundo análisis a posterior en torno a la georeferenciación a los diferentes sistemas de proyección con la finalidad de identificar en que sistema de proyección cartográfico existe una menor deformación con respecto a los elementos representados y al valor del ECM.

TABLA I  
ECM - RECTIFICACIÓN DE MAPAS HISTÓRICOS

TÍTULO	AÑO	NÚMERO PUNTOS	ECM M <sup>2</sup>
Mapa de Perú	1597	11	172981
Mapa de Perú	1637	17	103159
Mapa de Perú	1665	19	93546.7
Mapa de Perú a Brasil	1705	17	90280.6
Mapa de Perú	1719	7	29134.2
Mapa de Perú	1758	17	58251.7
Mapa de Perú	1812	10	21035.5
Mapa de Perú	1818	14	28769.7
Mapa de Perú	1821	14	14319.8
Mapa de Perú	1822	6	17299.3
Mapa de Perú	1826	24	15983.2
Mapa de Perú	1830	34	14292.3
Mapa de Perú, Brasil, Paraguay	1831	26	16507.4
Mapa de Perú y Bolivia	1832	19	9503.8
Mapa de Perú y Bolivia	1834	26	19338.2
Mapa de Perú y Bolivia	1837	19	34835
Mapa de Perú y Bolivia	1846	9	16745.2
Mapa de Perú y Bolivia	1851	12	43598.8
Mapa de Perú y Bolivia	1856	11	10709
mapa de Sudamérica	1856	24	46864.8
Mapa de Perú y Bolivia	1865	25	10395.8
Mapa de Perú y Bolivia	1869	28	32375.9
Mapa de América Central, Colombia, Ecuador, Perú, Venezuela	1929	36	10407.8
Mapa de Perú	1967	38	7386.15
Promedio del cálculo del Error cuadrático medio			53352.18

Fuente: Elaboración Propia

### IV. CONCLUSIONES

Por efecto de la representación de elementos de la cartografía histórica a comparación de la actual se determinó que el mejor criterio para ubicar los puntos homólogos de georeferenciación son los ubicados en torno al perfil costanero o a los cauces de ríos visibles e identificables.

Se identificó una tendencia en torno al año de publicación de los mapas los cuales a medida que pasan los años su ECM decrece obteniéndose así mapas muy próximos a la cartografía oficial, como se observa en el resultado del mapa de 1967 con un valor de ECM de 7386.15 m<sup>2</sup> siendo el coeficiente menor del conjuntos de mapas de estudio, aunque esta magnitud sigue siendo muy alta para este mapa, su principal razón es debido al tipo de proyección cartográfica utilizada y principalmente por la forma de distribución de los puntos dado que para estandarizar la metodología de georeferenciación se colocaron primero puntos alrededor del perfil costanero de los mapas, a razón identificar los elementos a referenciarse, pues muchos de estos son pictóricos o representativos más no espaciales que cumplan con un escala o elemento georeferenciado. Es por ello que se recomienda realizar una segunda fase de trabajo donde se analice la georeferenciación con diferentes sistemas de proyección cartográfica.

Finalmente se concluye que, con el transcurso del tiempo, el nivel detalle y el grado ajuste es aún mayor debido a la implementación de recursos tecnológicos especializados en la obtención de información, pero no cabe desestimar el esfuerzo, técnica y arte de los cartógrafos en la misión de generar

mapas de calidad a comparación de los actuales los cuales son la visión de muchos cartógrafos en la historia de poder representar en toda su plenitud una infinidad de información.

**REFERENCIAS**

Acero, G. (2017). Sistemas economicos o modos de produccion. Obtenido de Academia.ed el 10 de abril del 2017U: [https://www.academia.edu/19260363/SISTEMAS\\_ECONOMICOS\\_O\\_MODOS\\_DE\\_PRODUCCION](https://www.academia.edu/19260363/SISTEMAS_ECONOMICOS_O_MODOS_DE_PRODUCCION)

ESRI. (2015). Shapefiles (\*.shp) de Sudamérica. Obtenido el 28 de enero del 2017de <https://tapiquen-sig.jimdo.com/descargas-gratuitas/sudam%C3%A9rica/>

ESRI. (2016). Acerca de las transformaciones de ajuste espacial. Obtenido el 09 de abril del 2017 de ArcMap for Desktop: <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/editing-existing-features/about-spatial-adjustment-transformations.htm>

GENTE DIGITAL. (3 de 12 de 2010). El paso del hombre de nómada a sedentario. Obtenido el 10 de abril del 2017 de [gentedigital.es: http://www.gentedigital.es/palencia/noticia/431926/el-paso-del-hombre-de-nomada-a-sedentario/](http://www.gentedigital.es/palencia/noticia/431926/el-paso-del-hombre-de-nomada-a-sedentario/)

humanrightsaction. (9 de 11 de 2003). Democratización de la Información. Obtenido el 07 de abril del 2017de [humanrightsaction.org: http://www.humanrightsaction.org/information/spanish.html](http://www.humanrightsaction.org/information/spanish.html)

ICA. (1995). Cartografía Basica. Obtenido el 08 de abril del 2017 de INEGI: <http://www.inegi.org.mx/inegi/SPC/doc/INTERNET/MANUAL%20CartograFIA.pdf>

Instituto Cervantes . (2014). Cronología. Obtenido el 10 de abril del 2017 de [http://www.cervantes.es/lengua\\_y\\_enseñanza/independencia\\_americana/bicentenario\\_independencia\\_calendario.htm](http://www.cervantes.es/lengua_y_enseñanza/independencia_americana/bicentenario_independencia_calendario.htm)

Rumsey, D. (2017). Obtenido el 03 de febrero del 2017 de [www.davidrumsey.com](http://www.davidrumsey.com)

Rumsey, D. (01 de 2017). DAVID RUMSEY MAP COLLECTION. Obtenido el 03 de febrero de <http://www.davidrumsey.com/luna/servlet/RUMSEY-8-1>

Sánchez, J. (2008). Perspectivas de la información en Internet: ciberdemocracia, redes sociales y web semántica . Obtenido el 11 de abril del 2017 de ZER - Revista de Estudios de Comunicación: <http://www.ehu.es/ojs/index.php/Zer/article/view/3574/3202>

**VI. ANEXOS**

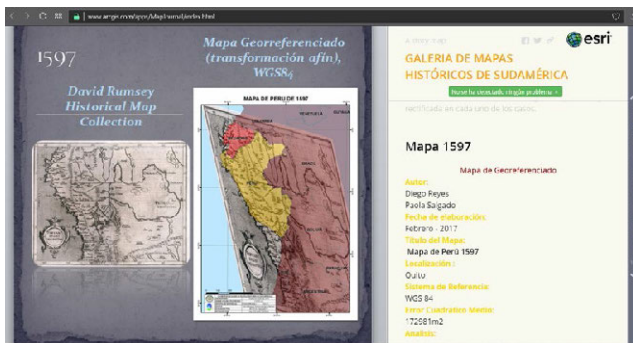


Figura 9: Mapa 1597  
Fuente: Elaboración Propia



Figura 11: Mapa 1822  
Fuente: Elaboración Propia



Figura 10: Mapa 1758  
Fuente: Elaboración Propia



Figura 12: Mapa 1967  
Fuente: Elaboración Propia





# Implementación del sistema de información geográfico catastral del cantón Déleg

Zhindón Martín<sup>1</sup>, Quevedo Sebastián<sup>2</sup>, Angamarca Pablo<sup>3</sup>, Córdova Federico<sup>1</sup>

1 Centro de Investigación/Unidad Académica de Ingeniería, Industria y Construcción/Universidad Católica de Cuenca  
Av. de las Américas/Azuay/Ecuador  
mgzhindonm@ucacue.edu.ec  
nfcordovag@ucacue.edu.ec

2 Ingeniería de Sistemas/Facultad de Tecnologías de la Información/Universidad Católica de Cuenca sede Azogues  
Av. Ernesto Cheguevara/Cañar/Ecuador  
asquevedo@ucacue.edu.ec

3 EVOTECH  
Panamericana Sur/Cañar/Ecuador  
pabloangamarca@gmail.com

## RESUMEN

La integración de la información geográfica y alfanumérica es de fundamental importancia en el diseño e implementación de un sistema para la gestión del catastro. Este trabajo presenta el proceso para el desarrollo de tal integración, como parte de la implementación de la plataforma tecnológica web para la gestión del catastro. Este trabajo no tiene como fin ser un informe de lo que fue el proceso completo de desarrollo y funcionalidad del sistema, pero se presenta de manera general las fases más importantes del proceso de ingeniería del software llevado a cabo. El desarrollo de la aplicación se basó en el uso de herramientas de software de código abierto como: PostgreSQL y PostGIS e Hibernate para el manejo de los datos; Java 8 y Java Enterprise Edition 7 (JEE7) como lenguaje de programación. Adicionalmente se crearon web map services utilizando Geoserver y también uno personalizado propio para el uso dentro de la aplicación utilizando JAX-RS e Hibernate Spatial y OpenLayers. La aplicación se integra con QGIS para la creación y gestión de la información geográfica, hasta la emisión de reportes con JasperReports que consume un WMS de Geoserver para presentar la forma del predio. El sistema fue implementado para el Gobierno Autónomo Descentralizado (GAD) Municipal del Cantón Déleg y construido basado en un sistema legado proporcionado por la Asociación de Municipalidades del Ecuador (AME).

Palabras clave: **catastro, información geográfica, modelos, orientación a objetos, integración.**

## ABSTRACT

*The integration of a geographical and alphanumeric information has a fundamental importance in the design and implementation of a system for the management of the cadastre. This paper presents the process for the development of such integration, as part of the implementation of the web technology platform for cadastre management. This work is not intended to be a report of what was the complete process of development and functionality of the system, but is presented in a general way the most important phases of the software engineering process carried out. The development of the application was based on the use of open software source tools such as: PostgreSQL and PostGIS and Hibernate for data management; Java 8 and Java Enterprise Edition 7 (JEE7) as a programming language. In addition, web map services were created using Geoserver and also a custom one for the within use of the application using JAX-RS and Hibernate Spatial and OpenLayers.*

*The application integrates with QGIS for the creation and management of geographic information, until the reports emission with JasperReports that consumes a Geoserver WMS to present the form of the property. The system was developed for the Decentralized Autonomous Government of Déleg Canton, it was built based on a legacy system provided by the Association of Municipalities of Ecuador (AME).*

*Keywords: cadastre, geographical information, models, object oriented, integration.*

## I. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de información (SI) legados se han convertido en el núcleo de operaciones de organizaciones públicas y privadas. Éstos fueron creados e implementados varios años atrás y mediante constantes actualizaciones se han ajustado a los requerimientos de los procesos de negocios (Dayani-Fard & Al., 1999). En este contexto, el Gobierno Autónomo Descentralizado municipal del Cantón Déleg, entidad pública a la que, de ahora en adelante nos referiremos como GAD municipal, realiza la gestión de la información catastral con un SI legado, implementado mediante transferencia tecnológica a través de la AME. Este sistema realiza la gestión de la información geográfica catastral mediante una variación del modelo topológico vectorial conocido como Modelo GEORELACIONAL (Longley, Goodchild, Maguire, & Rhind, 2015). Éste tipo de modelos mantienen las características geográficas del objeto en un archivo regular y sus atributos alfanuméricos en una base de datos relacional. Específicamente las características geográficas de los predios se encuentran en archivos CAD y los atributos alfanuméricos que los describen se almacenan en la base de datos relacional del SI, en donde el campo común entre éstos es la clave catastral.

El problema del SI del GAD Municipal se presenta de acuerdo a lo planteado por (Pressman & Maxim, 2015) y contextualizado con requerimientos específicos que fundamentan el desarrollo de un nuevo sistema: (1) El SI tiene que ser mejorado para implementar el requerimiento de integración de las características geográficas del predio y sus atributos alfanuméricos, debido a que al manejar el modelo geográfico como un archivo común, los usuarios de los diferentes departamentos del GAD municipal, utilizan diferentes copias de éste y los cambios que se realizan sobre estos de manera aislada provoca que se manejen modelos inconsistentes, ya que la forma de comunicar los cambios es verbal o mediante sincronización manual del modelo. Además no existe garantía de la congruencia entre la información que se maneja en CAD y la base de datos relacional, puesto que el registro de la clave se realiza por separado y de forma manual. (2) Permitir el acceso a la información del catastro mediante Internet. Para cubrir con este requerimiento el software debe ser adaptado para cubrir las necesidades de nuevos ambientes de computación, específicamente el software debe evolucionar a un ambiente Web. En el contexto de la ciencia de la información geográfica a éste requerimiento se encuentra dentro de lo que se conoce como Neo geografía (Longley et al., 2015). De esta manera la plataforma se convierte en una herramienta que da lugar a un proceso que transparentaría y democratizaría la información del catastro (Tapscott, 2014).

Debido a múltiples restricciones que presenta el SI legado del GAD municipal, como: la falta de documentación, limitantes propias del lenguaje de programación, ausencia de soporte y arquitectura a dos capas, no es posible aplicar un proceso de reingeniería, para solventar los nuevos requerimientos. Debido a lo

anterior se determinó la necesidad de implementar una nueva plataforma tecnológica que de soporte a la gestión del catastro.

Para determinar de la solución propuesta, se consideró como principal antecedente que en el Ecuador se encuentra establecida como política pública el uso del software libre (Decreto No 1014, 2008). En éste contexto existen diferentes tipos de software, entre los cuales se encuentra: los de sistema, de aplicación, aplicaciones web, científicos o de ingeniería entre otros (Pressman & Maxim, 2015).

Luego de haber realizado un análisis de las soluciones de las aplicaciones de software disponibles, ofrecidas a nivel local por consultoras y a nivel global mediante la implementación de sistemas como SOLA<sup>1</sup>, el GAD municipal determinó que era conveniente el desarrollo de una nueva plataforma acorde a las necesidades de la entidad. Esto debido a que a pesar de que las aplicaciones de software disponían de funcionalidades para manejar los procesos de catastro, era necesario realizar adaptaciones adicionales, lo que al igual que al desarrollo de una herramienta completamente nueva involucra costos y tiempos, de implementación (Cuan, Delgado, Elisa, Uribe, & de Santiago, 2016), pero sin garantizar que la aplicación se adapte por completo a los procesos catastrales.

El objetivo de este trabajo es construir un nuevo sistema de información que permita la gestión integrada de la información geográfica, mediante la implementación de un modelo de datos geográfico que integre las características geográficas de los predios y sus atributos alfanuméricos, y que permita que esta información pueda ser accedida a través de la Web.

## II. MÉTODO

La integración geográfica y alfanumérica constituye parte de las etapas de la metodología empleada para el desarrollo completo del SIG Catastral, aunque no se brinda un detalle completo de cada una de éstas, se incluyen apartados relevantes para comprender el contexto en el cual se desarrolló el trabajo.

Las fases que se presentan a continuación se encuentran enmarcadas en la metodología para la solución de problemas propuesta por (Polya, 1945), articuladas al marco genérico del proceso de desarrollo de proyectos de Ingeniería de Software, de acuerdo a (Pressman & Maxim, 2015). Además, debido al estilo de desarrollo de software empleado, las fases se desarrollaron con inclinación hacia la orientación a objetos (Phillips, 2015).

### A. COMPRENSIÓN EL PROBLEMA

Es el proceso de identificación del dominio del problema, sistemas o tareas. En esta etapa se determina que se tienen que realizar. En el caso concreto de este proyecto, este proceso se llevó a cabo de la siguiente manera: (1) se realizó un análisis detallado del sistema legado con el cuál se realizaba la gestión de la información catastral para identificar su tecnológica,

<sup>1</sup> <http://www.flossola.org/>

funcionalidades y las tareas que con este se llevaban a cabo. Concretamente con la parte geográfica sus funcionalidades y deficiencias se obtuvieron del desarrollo de esta fase y ya fueron presentadas en la sección introductoria de este trabajo. (2) Se procedió a realizar una serie de entrevistas informales con los involucrados en los procesos de la gestión de la información catastral. De estas entrevistas identificamos en primer lugar que la forma de cotejar la información se realizaba de forma visual identificando la clave catastrales en el SI y el CAD, sin que nada garantice su correcta integración. (3) Se identificaron los nuevos requisitos del sistema, de los cuales, entre otros destacamos la necesidad de gestión de la información como una plataforma Web. Algunos de estos requerimientos de usuario se plasmaron en un documento de Especificación de Requisitos de Software (ERS) IEEE Std 830-1998<sup>2</sup>.

**B. PLANIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN**

En esta etapa se crea una especificación de implementación, tomando como base el levantamiento de requerimientos. De manera general los componentes de esta especificación son: los modelos de datos y el diseño de la arquitectura.

Previo al proceso de la definición y creación de los modelo se determinó que la escala del problema es detallada, debido a que la información geográfica a representar principalmente corresponde a forma, ubicación y tamaño de las parcelas, su propósito es normativo y en la escala de tiempo es operacional (Longley et al., 2015).

Los modelos permiten crear una representación simplificada de la realidad a través de un proceso de abstracción. Uno de estos modelos, es el modelos de datos geoespaciales, que a más de representar los atributos de un fenómeno de la realidad, representan su característica espacial (Menke, 2016).

El proceso para la creación del modelo inició con la identificación de los fenómenos que son relevantes al dominio del problema, iniciamos con la identificación de las características de las parcelas con un enfoque geográfico: (1) Cada una de las parcelas poseen límites bien definidos y corresponden a un número finito dentro de la jurisdicción del GAD municipal, por lo que el esquema conceptual para su representación es el de un objeto discreto. (2) en cuanto a su dimensión topológica posee dos dimensiones, largo y ancho y puede ser representado con un objeto geométrico de tipo área o polígono. (3) de acuerdo a estas características, su representación inicial se realizó con el modelo lógico de datos geoespacial vectorial. La desventaja de este modelo radica en que su enfoque principal no va más allá de la geometría, y no permite implementar las complejas relaciones existentes con los demás dominios que conforman el sistema catastral. (4) Como solución para aprovechar el modelo vectorial y al mismo tiempo modelar éstas relaciones, se creó un Modelo Lógico de Datos de Objetos Geográficos (Figura 1) (Longley et al., 2015).

La arquitectura de Diseño guiado por el Dominio (DDD), permite a través del enfoque tradicional del Análisis y Diseño Orientado a Objetos (Remijan, 2014), construir el sistema de información geográfica con unas variantes en la capa RDBMS, (Figura 2).

La estructura y las herramientas Postgres<sup>3</sup> y PostGIS<sup>4</sup> de la capa de persistencia permiten construir el Modelo físico<sup>5</sup> de

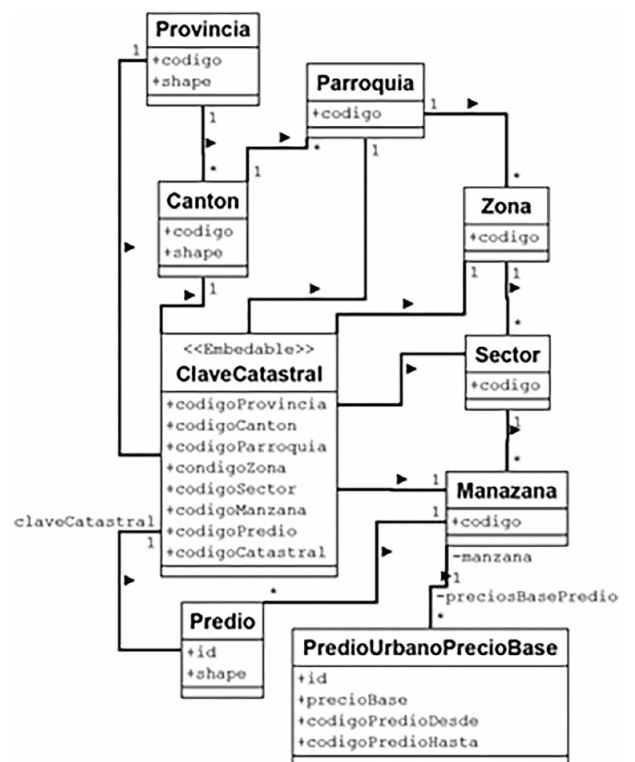


Figura 1. Modelo de datos de objetos geográficos del módulo de organización territorial y su relación con el predio y estructura de clave catastral.

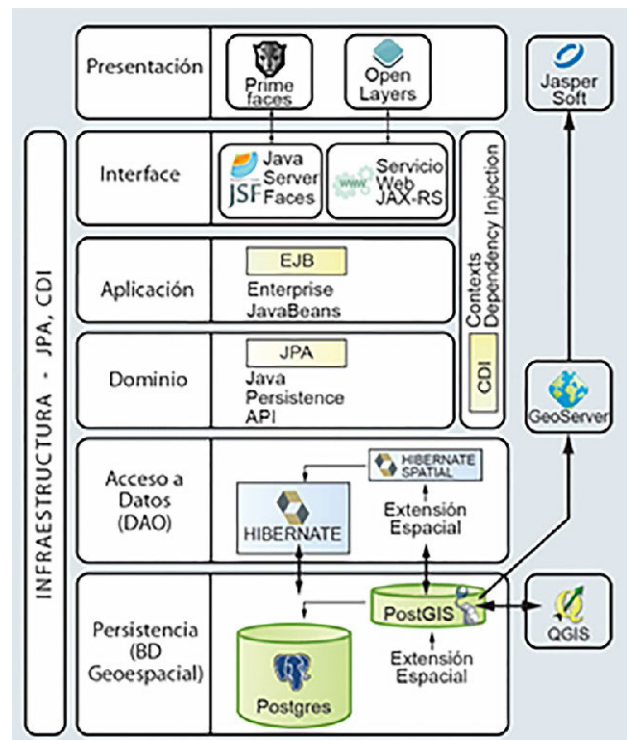


Figura 2. Diseño de la arquitectura del sistema.

2 IEEE Std 830-1998, estándar para el registro de requerimientos de software.  
 3 <https://www.postgresql.org/>  
 4 <http://www.postgis.net/>  
 5 Término aceptado, aunque el modelo existe digitalmente en un computador (Longley et al., 2015)

datos de objetos geográfico. La capa de persistencia corresponde la base de datos geoespacial, que en el contexto de este proyecto se utiliza como contenedor y organizador de la información geográfica, pero a diferencia de lo planteado por (Obe, Hsu, & Wood, 2015), se considera su potencial de análisis espacial, ya que esta capa constituye la plataforma base para el desarrollo de trabajos futuros.

En la capa DAO<sup>6</sup> se utiliza Hibernate Spatial<sup>7</sup>, que es una extensión de Hibernate<sup>8</sup>, que permite implementar el ORM<sup>9</sup>, para que las demás capas de la arquitectura, accedan a los datos geográficos persistentes en la base de datos Geoespacial. Esta es una modificación a la implementación de referencia estándar de JPA.

La construcción de la arquitectura DDD se realizó con el marco de desarrollo Java<sup>10</sup> Enterprise Edition (JEE7). En la capa de la Interfaz se creó un servicio Web personalizado con JAX-RS, el cual es consumido por OpenLayers<sup>11</sup> para presentar la geometría de los predios en el formulario Web, además se utiliza el servidor de mapas Geoserver<sup>12</sup>, que proporciona el WMS, que permite mostrar la geometría del promedio en reportes PDF, generados por JasperReports<sup>13</sup>.

Todas las herramientas empleadas en el desarrollo se pueden describir de acuerdo a (Smith, 2012), bajo el término umbrella de Software Libre y de Código abierto (FOSS), por sus siglas en Inglés.

### C. EJECUCIÓN DEL PLAN

En esta fase del proyecto se realizó la creación de la arquitectura del proyecto empleando las herramientas de software detalladas en la (Figura 1), se construyó el modelo físico de datos geográfico y se dotó de funcionalidad a los modelos, considerando los procesos de negocios del GAD Municipal, a través de la programación.

### III. RESULTADOS

Los resultados son el producto de la ejecución de cada una de las fases de la metodología empleada: en la fase de comprensión del problema se obtuvieron los documentos ERS con la especificación de los requisitos de software; en la fase de la planificación del problema, los modelos de datos y diseño de la arquitectura; y en la fase de ejecución del plan, el sistema de información geográfico catastral.

El sistema permite la creación y edición de las características geográficas de los predios con QGIS<sup>14</sup>, el cual se encuentra conectado con la base de datos Geoespacial. Para crear la información alfanumérica es necesario acceder al formulario web que lista todos los predios creados, que no poseen una ficha catastral (Figura 3), en éste es posible visualizar su geometría de manera gráfica y al seleccionar uno de éstos, el sistema muestra el formulario para el ingreso de propietario, información legal, atributos topográficos, infraestructura de servicios, usos de suelo y bloques (Figura 4). Además permite la impresión de la ficha catastral del predio en formato PDF incluyendo la forma del predio, escala y sus coordenadas (Figura 5).

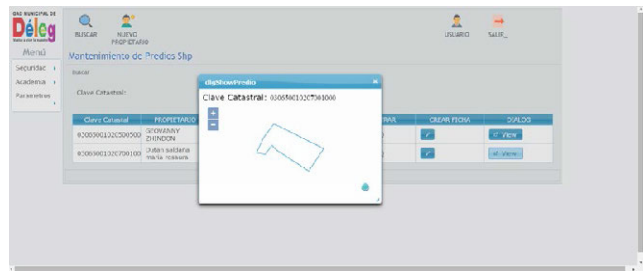


Figura. 3. Vista previa desde la aplicación de la Geometría del Predio creada en QGIS.

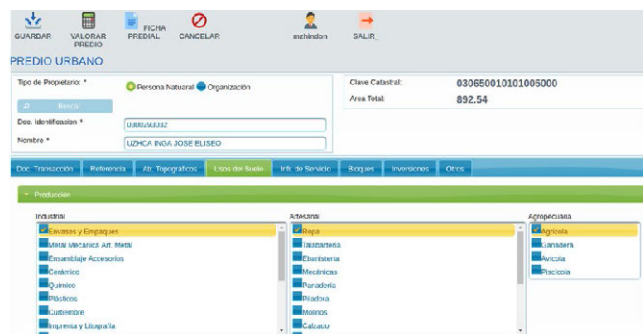


Figura. 4. Formulario para ingresar Información alfanumérica de la Ficha Catastral.

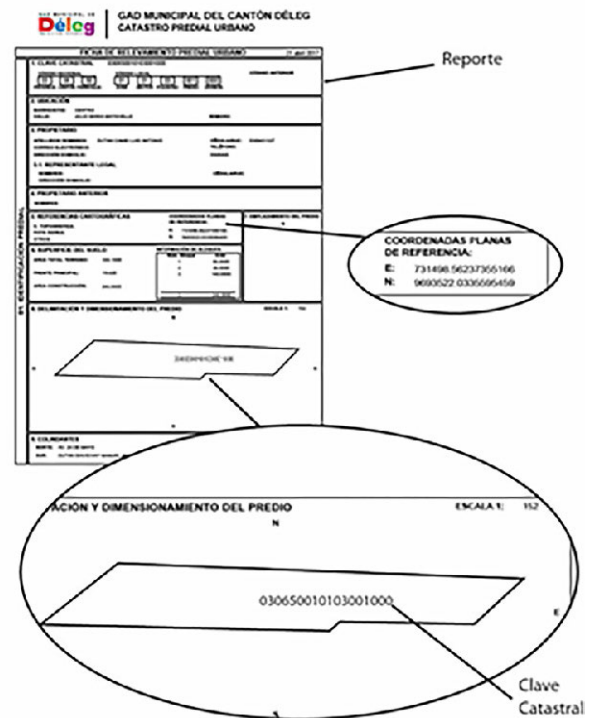


Figura. 5. Geometría del predio impreso en el Reporte de Ficha Catastral, generado con JasperReport, consumiendo un servicio WMS de Geoserver.

6 (Gregory, By, & Demichiel, 2016)  
 7 <http://www.hibernate.org/>  
 8 <http://hibernate.org/orm/>  
 9 (O'Neil, 2008)  
 10 <https://www.java.com/en/>  
 11 <https://openlayers.org/>  
 12 <http://geoserver.org/>  
 13 <http://community.jaspersoft.com>  
 14 <http://www.qgis.org/en/site/>

#### IV. CONCLUSIONES

El sistema de información geográfico permite el manejo integrado de la información, lo que garantiza la consistencia del inventario catastral. Además su arquitectura permite el manejo y el acceso a la información a través de la Web. El proceso de desarrollo se realizó con el soporte de la ciencia de la información geográfica, es decir considerando los principios y conceptos teóricos que fueron puestos en práctica en la construcción de la aplicación (Longley et al., 2015). Desde el punto de vista de la ciencia es una implementación práctica de la denominada neogeografía (Haklay, Singleton, & Parker, 2008). Los modelos de datos y la arquitectura del sistema que fueron diseñados para que el sistema pueda ser escalado y evolucione (Pressman & Maxim, 2015), inmediatamente se han vuelto

prioritarios, debido a que en octubre de 2016, la Dirección Nacional de Catastros emitió las Normas Técnicas para Catastro de Bienes Inmuebles Urbanos y Rurales del Ecuador, en el que se establece nuevos requisitos que van desde el registro de información socio-económica hasta la implementación de modelos econométricos para la valoración de bienes inmuebles (Catastro, 2016), razón por la cual la ventaja de disponer de un sistema completamente nuevo desarrollado a medida permitirá que la implementación de los nuevos requerimientos se realice de manera relativamente sencilla. De esta manera queda marcada la ruta para la segunda etapa del proyecto, y quedando evidenciado que el sistema puede adaptarse a las dinámicas de cambio propias del territorio, en este caso determinadas por la política pública.

#### AGRADECIMIENTOS

Agradecemos por la importante colaboración en el proyecto, al Ing. Jhony Cuzco, técnico del GAD Municipal y al Ing. Vinicio Fernandez, técnico de GRAIMAN.

#### REFERENCIAS

- Catastro, D. N. de. (2016). ACUERDO MINISTERIAL No. 029-16. Retrieved from <http://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2016/08/Acuerdo-Ministerial-No-0029-16-Normas-Tecnicas-Nacionales-para-el-Catastro-de-Bienes-Inmuebles-Urbanos-Rurales-y-Avaluos-de-Bienes-Operacion-y-Calculo-de-Tarifas-de-la-Dinac.pdf>
- Cuan, E., Delgado, J. L., Elisa, U., Uribe, D., & de Santiago, A. (2016). Desarrollo de un sistema de planificación de recursos de producción MRPII a la medida. In Centro de Investigaciones en Óptica (Ed.) (pp. 1-5).
- Dayani-Fard, H., & Al., E. (1999). Legacy software systems: Issues, progress, and Challenges.
- Gregory, G., By, F. O., & Demichiel, L. (2016). Java Persistence with Hibernate.
- Haklay, M., Singleton, A., & Parker, C. (2008). Web Mapping 2.0: The Neogeography of the GeoWeb. *Geography Compass*, 2(6), 2011-2039. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2008.00167.x>
- Longley, P., Goodchild, M., Maguire, D., & Rhind, D. (2015). *Geographic Information Science and Systems* (fourth ed.). John Wiley & Sons, Inc.
- Menke, K. (2016). Discover QGIS.
- O'Neil, E. J. (2008). Object/relational mapping 2008: hibernate and the entity data model (edm). In Proceedings of the 2008 ACM SIGMOD international conference on Management of data (pp. 1351-1356).
- Obe, R. O., Hsu, L. S., & Wood, B. (2015). PostGIS in Action.
- Phillips, D. (2015). Python 3 Object-oriented Programming. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.834800>
- Polya, G. (1945). How to Solve It. *The Mathematical Gazette*. <https://doi.org/10.2307/3609122>
- Pressman, R. S., & Maxim, B. R. (2015). *Software Engineering-A Practitioners Approach*. <https://doi.org/10.2991/978-94-6239-006-5>
- Remijan, M. (2014). Debu Panda Reza Rahman Ryan Cuprak Michael Remijan.
- República del Ecuador, P. Decreto, Pub. L. No. 1014, 4 (2008). Quito, Ecuador.
- Smith, R. (2012). *Linux Essentials*.
- Tapscott, D. (2014). *The digital economy: Promise and peril in the age of networked intelligence* (2nd ed., Vol. 1)



# La regularización predial en el Ecuador y su relación con el incremento del acceso al crédito

Ochoa Arias, Paúl<sup>1</sup>; Enríquez García, María José<sup>2</sup>

1 Instituto de Estudios de Régimen Seccional (IERSE)/Universidad del Azuay  
Av. 24 de Mayo 7-77/Cuenca / Ecuador  
pochoa@uazuay.edu.ec

2 Laboratorio del Territorio LABORATE / Universidad de Santiago de Compostela  
/ Campus Lugo / España  
mariajose.enriquez.garcia@usc.es

## RESUMEN

El principal paradigma económico del s. XXI presenta la titulación de tierras como premisa para mejorar el acceso a crédito agrario y, con ello, promover los mercados de tierras, la productividad agraria y la recaudación de impuestos rurales. No obstante, la literatura empírica que avalúa el impacto de los proyectos de regularización muestra cierta contradicción. Los programas PRAT (2002-2008) y SIGTierras (2011-2017) financiados por el BID y ejecutados por el MAGAP y el Proyecto de Legalización Masiva de Tierras de la STRA son algunas de las iniciativas de regularización más recientes en Ecuador. A la espera de evaluación de impacto de dichas intervenciones, el presente trabajo pretende disertar sobre la existencia de limitaciones al acceso a crédito adelantadas por la literatura internacional. Las parcelas de pequeño tamaño (70 %) son poco atractivas como garantía ante las instituciones financieras formales. Además, las estadísticas oficiales identifican que el 10 % de los hogares rurales que acceden a crédito lo hacen a través de familiares y amigos o pequeñas cooperativas de crédito, siendo la maquinaria y los vehículos una garantía tan habitual como la tierra. Finalmente, la complejidad y alto coste monetario de los protocolos de regularización a instancia de parte (20 % del valor de la parcela, en algunos casos) hacen de los títulos una inversión más que una garantía. En este contexto, se prevé pues que la regularización aumentará el acceso a crédito siempre y cuando se acompañe de medidas transversales e integrales de desarrollo y reestructuración agraria.

Palabras clave: **Catastro rural, regularización, crédito agrícola, productividad agropecuaria.**

## ABSTRACT

*The main economic paradigm of the XXI century presents lawful land ownership as a premise to improve access to agrarian credit and, thereby, promote land markets, agricultural productivity and rural tax collection. However, the empirical written language that assesses the impact of regularization projects has both positive and negative elements. The PRAT (2002-2008) and SIGTierras (2011-2017) programs financed by BID and executed by MAGAP and the STRA Land Mass Legalization Project are some of the most recent regularization initiatives in Ecuador. Pending the evaluation of the impact of these interventions, this paper aims to discuss the existence of limitations to access to credit given by the international bibliography.*

*Small plots (70%) are unattractive as a guarantee to formal financial institutions. In addition, official statistics show that 10% of rural households that access to credit do so through relatives and friends or small credit unions. Machinery and vehicles are also used as common guarantee as land. Finally, the complexity and high monetary cost of the regularization protocols at the request of a party (20% of the value of the plot, in some cases) make these securities an investment rather than a guarantee. In this context, it is expected that regularization will increase access to credit as long as it is accompanied by transverse and comprehensive measures of development and agricultural restructuring.*

**Keywords:** Rural land registry, regularization, agricultural credit, agricultural productivity.

## I. INTRODUCCIÓN

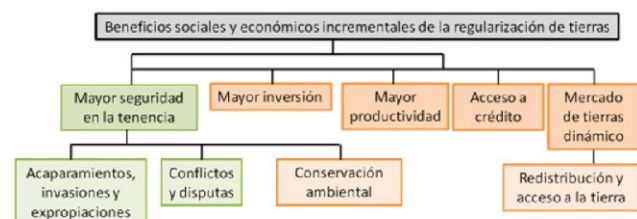
A pesar de que la tasa de incidencia de la pobreza en el mundo se ha reducido de un 33,4 % a un 10,4 % entre 1993-2003 según datos del Banco Mundial, Ecuador se mantiene en un 22,5 % nacional y en 42 % rural, cifre que le ubica una posición intermedia respecto a otros países de América Latina como Costa Rica (27.8%), Chile (27.9 %), Paraguay (32 %), El Salvador (37.9 %), Colombia (42,8 %), Perú (48 %), Bolivia (59,9 %) u Honduras (68.5%) de tasa de incidencia de pobreza rural sobre la base de la línea de pobreza nacional en 2013 (World Bank, 2016).

Igualmente respecto del índice de Gini el 0,47 de Ecuador sugiere un nivel de desigualdad intermedio al respecto de Uruguay (0,41), El Salvador (0,44), Perú (0,45), Bolivia (0,48), Costa Rica (0,49) o Brasil, Colombia y Honduras (0,53) (World Bank, 2016). En el caso particular del acceso a la tierra, Ecuador (0,8 - 2000) presenta una concentración más acuciante que El Salvador (0,58 - 2007) u Honduras (0,66 - 2000) y un tanto inferior a Brasil (0,86 - 2006), Perú (0,86 - 2012), Colombia (0,88 - 2001), Chile (0,91 - 2007) ó Paraguay (0,94-2008).

En este contexto, la agricultura en el Ecuador representa alrededor del 14 % del PIB (MAGAP, 2016), siendo el componente que más aporta a la economía ecuatoriana. En términos de empleo una cuarta parte de la población económicamente activa se relaciona con la agricultura.

Uno de los supuestos del principal paradigma económico sobre los sistemas de administración de tierras y programas de titulación es que éstos son la premisa para el desarrollo de las economías agrarias campesinas (Soto, 2000) y, por consiguiente, los inconvenientes que atávicamente estancan a la agricultura tradicional tienen que ver con la inseguridad en la tenencia de la tierra, con la dificultad de acceso a crédito, inadecuada tecnificación, dificultad de acceso a mercados y baja rentabilidad.

Al amparo de dicho paradigma, la regularización y titulación de la propiedad de la tierra responde a dos fines diferenciados aunque la bibliografía no siempre los recoja de forma separada dado lo entrelazado de ambos (figura 1)



Fuente: De Soto (2000); Deininger (World Bank-2003); Conroy et al. (BID - 2014)

Figura 1. Beneficios de la regularización

Este paquete de expectativas ha sido mantenido por la literatura económica de comienzos del siglo XXI que, en entornos

rurales, ha sido construida en manuales genéricos de buena prácticas y recomendaciones relativas a 1) la necesidad de instituciones para la regularización, administración y gestión de tierras y 2) el potencial de los sistemas de información geoespacial (Feder y Nishio, 1998; Feder, 1999; Deininger y Feder, 2001; Deininger, 2003; Deininger, 2010). A su vez, su impacto ha sido objeto de análisis en distintas regiones del planeta (K. Deininger 2003; K. Deininger, Zegarra, y Lavadenz 2003; K. Deininger et al. 2003; K. Deininger y Jin 2003; K. Deininger, Selod, y Burns 2012; K. Deininger, Savastano, y Carletto 2012; K. Deininger, Hillhorst, y Songwe 2014) al amparo de los distintos proyectos de regularización de tierras urbanas y rurales que instituciones de financiación como el Banco Mundial y el BID han puesto en marcha, también en América Latina (Clichevsky 2006; Conroy et al. 2014).

En la práctica, las evidencias empíricas han arrojado luces y sombras sobre dichas expectativas. Las evaluaciones de impacto de dichos programas han encontrado evidencia de que la regularización de la tenencia ha generado, sobre todo, un aumento en la inversión, pero los trabajos sobre el impacto en el acceso a crédito y el aumento del número de transacciones a través del mercado de tierras son menos concluyentes y, por ende, también los efectos positivos en el valor de la tierra y la productividad agrícola (Carter y Chamorro, 2000; Conroy et al., 2014).

Una buena parte de los trabajos de evaluación de impacto se centraron en el acceso a crédito en tanto en cuánto los títulos actúan como sistema de aval para el acceso a crédito de cara a la ampliación de la base territorial a través del mercado de tierras (articulación del mercado de tierras) como de adquisición de capital para la tecnificación y mejora productiva de la explotación (valoración de tierras y productividad agrícola). En este sentido, Lawry et al. (2014) llevaron a cabo una revisión de diferentes estudios y proyectos relacionados con la seguridad en la tenencia de la tierra y, aunque respaldaron la idea de que inseguridad reduce el acceso a crédito, no pudieron concluir que otros estatus de tenencia (parcelas con documentos otorgados tras la reforma agraria o con evidencias de posesión pero sin título) estuvieran relacionados con el acceso a crédito. Los trabajos de Foltz et al. (2000) y Kerekes y Williamson (2010) tampoco identificaron una correlación significativa entre las intervenciones de regularización y el aumento del acceso a crédito de los hogares rurales y/o unidades de producción agraria.

El caso particular de Ecuador ha seguido idénticas etapas de intervención en la gestión y administración de tierras que otros países de América Latina. En concreto, una primera oleada de Reformas Agrarias con el propósito de redistribución y titulación de tierras por parte del Estado al pequeño campesino entre los 50 y los 60, una segunda etapa de intervenciones puntuales por distintas instituciones públicas y privadas al amparo del modelo de Desarrollo Rural Integral que llevaron a cabo intervenciones de regularización de tie-



rras localizadas (Asociación de Municipalidades de Ecuador; Centro de Levantamientos Integrados de Recursos Naturales por Sensores Remotos - CLIRSEN; INDA, INEFAN, Ecuatoriana de Servicios Agrícolas, Fondo Ecuatoriano Populorum Progressio) y finalmente una tercera etapa desde los años 80 a la actualidad de proyectos de regularización por instituciones internacionales bajo el paradigma ya comentado de los sistemas de administración y titulación de tierras (USAID, 1985; SUBIR-CARE, 1991; PRONADER, 1992; PRODEPINE, 2003; PRAT, 2008; ATLM-MAGAP, 2010, SIGTierras, 2010). De todos ellos se destaca el Programa Piloto de Regularización y Administración de Tierras Rurales (PRAT) (2002-2008), que en su segunda etapa de ejecución se denominó SIGTierras (2011-2017), en los que el Gobierno de Ecuador a través del MAGAP y mediante sendos créditos BID se propusieron brindar seguridad jurídica a los derechos de propiedad, apoyar la aplicación de políticas tributarias de los cantones y proveer información para la planificación y ordenamiento territorial del área rural en 8 y 50 cantones, respectivamente, a través de un sistema eficiente de gestión de catastro y herramientas para el registro de la propiedad de la tierra rural.

Precisamente, el estudio de Línea Base del Proyecto SIGtierras (SIGTierras, 2016) revela que la seguridad en la tenencia es la principal razón por la cual los propietarios y poseedores ecuatorianos consideran importante la regularización. Sólo en el 6% de los hogares, tanto de los cantones intervenidos como no intervenidos por el proyecto de regularización de la tierra consideran el acceso a crédito una razón para la regularización (Figura 2).

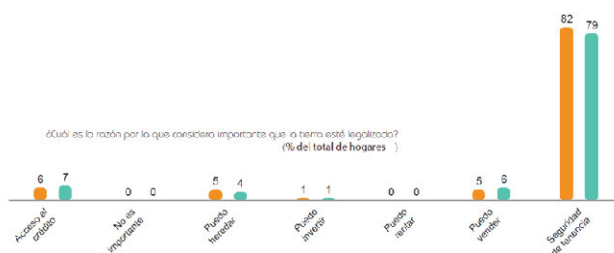


Figura 2. Razones para regularizar. Fuente: Encuesta Línea Base - SIGTierras (2014)

Si bien, el efecto de la titulación sobre la productividad agrícola y el valor de la tierra ha sido estudiado en trabajos como el de Francescutti (2002), el impacto sobre el acceso a crédito no ha tenido un desarrollo metodológico o analítico específico, a esperas de la evaluación de impacto del proyecto SIGTierras.

II. OBJETIVO

El objetivo del presente trabajo es reflexionar sobre la situación de tenencia de la tierra en Ecuador y sobre el estado de cuestión de las tres causas que limitan la correlación entre regularización y acceso a crédito enunciadas por Lawry et al. (2014) en una revisión de diferentes estudios y proyectos relacionados con la seguridad en la tenencia de la tierra en varios países en desarrollo:

- 1) Las características de las propiedades (pequeñas explotaciones de población rural con escasos recursos) pueden resultar poco atractivas para ejercer el papel de garantía ante las instituciones financieras con independencia de la situación de tenencia;
- 2) La tipología de las instituciones de crédito, pues las instituciones informales locales de ahorro y préstamo se basan en el capital social y no emplean activos fijos como garantía;

- 3) los costos de transacción derivados del acceso a crédito por canales formales a través de la titulación de predios adoptan cuantías muy altas en relación a la rentabilidad de los hacendados o al valor de la tierra.

III. MÉTODO

La metodología propuesta incluye la revisión bibliográfica de trabajos previos y fuentes de información estadísticas nacionales, gubernamentales o no gubernamentales, que permitan contextualizar la situación de tenencia, las instituciones de administración de tierras, las características de la propiedad, la tipología de entidades de acceso a crédito empleadas por los hogares y los costos de regularización para, finalmente, valorar en qué medida los proyectos de regularización deben ir acompañados de otras políticas de incentivo del acceso a crédito que contemplen el estado de la cuestión y las idiosincrasias nacionales, regionales y locales a este respecto.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

IV.I. LA SITUACIÓN DE TENENCIA EN ECUADOR

Se considera regularización de la tenencia de la tierra a un proceso administrativo que tiene por objeto el reconocimiento jurídico de los derechos sobre la posesión de la tierra (derechos de uso, de transformación, de exclusión y/o de transferencia) ejercida por particulares individuales o colectivos durante varios años (Edouard y Jarquin 2015). En particular, el art. 54 de la Ley Orgánica de Tierras y Territorios Ancestrales, marco normativo actual en Ecuador, define la regularización de la posesión agraria como el conjunto de acciones para legalizar, titular, redistribuir o reconocer el derecho a la propiedad sobre la tierra rural estatal. En particular, el art. 35 incluye como tal los actos administrativos de: a) titulación de tierras rurales estatales en favor de personas y de organizaciones que se encuentren en posesión agraria ininterrumpida por un lapso mínimo de cinco años; b) redistribución de tierras rurales estatales mediante adjudicación a organizaciones que carecen de tierra o que tienen una extensión menor a la unidad productiva familiar; c) legalización de territorios ancestrales en favor de las comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades que se encuentren en posesión ancestral y d) el saneamiento y resolución de conflictos en tierras tituladas mediante la aplicación del procedimiento de mediación en sede administrativa común, sobre las controversias que se susciten en los trámites de titulación o redistribución.

En esta diferenciación de casuísticas recogidas en la ley, la regularización puede ser considerada como una política de titulación o de saneamiento jurídico (Figura 3) diferenciándose ambas en que la primera supone el reconocimiento por el Estado de los derechos de posesión a través de una autoridad institucional con competencias para extender un documento público de origen administrativo o notarial mientras que el saneamiento es un proceso por el cual se actualiza la titularidad de un derecho real preexistente a instancia de parte (saneamiento jurídico) (Edouard y Jarquin, 2015).



Figura 3. La regularización como titulación o saneamiento jurídico

A pesar de que el marco normativo estatal recoge esta diferenciación de casuísticas se desconoce, en términos cuan-

titativos, cuánta superficie nacional se encuentra en cada caso. No existen censos estatales que muestren la cantidad de tierras objeto de regularización en el país según protocolos oficiales y, por tanto, es difícil saber cuáles de ellos impulsar, financiar, simplificar o remodelar (volumen de tierras objeto de titulación por el MAE, volumen de tierras ocupadas objeto de adjudicación por el INDA/STRA, volumen de tierras del Estado objeto de redistribución, volumen de tierras con un título entregado pero no actualizado a instancia de parte por herencias o transacciones, volumen de tierras con título pero inmovilizadas por un conflicto de tenencia...). Morales et al. (2010) toma un promedio de los datos de un estudio de la FAO del año 2000 y los datos del proyecto PRAT de 2008 (predecesor del proyecto SIGTierras) para estimar que las tierras por legalizar en el Ecuador suman el 35 % de la superficie del país (entre superficie agraria competencia de la STRA y la superficie de bosques protectores y patrimonio forestal del Estado gestionado por el Ministerio del Ambiente) y que casi el 43 % de la superficie tiene título que necesita ser perfeccionado.

**TABLA I.**

Necesidades de legalización y regularización en el Ecuador.  
Fuente: Morales et. Al. (2010)

TIERRAS POR LEGALIZAR EN EL ECUADOR				
Instituciones	Datos Estudio FAO (2000)	Datos SIG Tierras (2008)	Promedio nacional	Superficie (ha)
Tierras INDA	27%	12%	19.5%	5'297.385
Tierras MAE	10%	No existen	10%	2'800.000
<b>Total</b>				<b>8'097.385</b>

TIERRAS CON TÍTULO QUE REQUIEREN SER REGULARIZADAS (ha) (Datos FAO y SIG Tierras)			
Ítems	Estudio ECOLEX/FAO (2000)	Datos SIG Tierras (2008)	Superficie titulada con algún problema de tenencia (promediando las cifras a nivel nacional)
Ha	7'852.949 <sup>16</sup>	11'000.000 <sup>20</sup>	9'431.474
% del país	30%	53%	42.5%

A razón de los datos (Tabla I), la relevancia de la necesidad de regularización queda justificada por el mero hecho de que entre ambas suman el 63 % de la superficie del país.

Según el trabajo de López-Sandoval (2011), a partir también de los datos del III Censo Nacional Agropecuario (Figura ), la región de la costa concentra un alto número de unidades de producción agropecuaria, la mitad de ellas sin título de las tierras. En contraste, la sierra con la mayor concentración de Unidad de Producción Agropecuaria (UPAs), pero con un alta proporción de tierras con título y en la amazonia, con pocas UPAs pero con una alta proporción de tierras sin regularizar (Figura 4).

Según los datos obtenidos de la Síntesis del estudio de Línea Base del programa SIGTierras (SIGTierras, 2016), la mitad de los poseedores de parcelas, sea por herencia o por compraventa, carecen de documentos que avalen la tenencia; en torno al 40 % tiene escritura pública y el resto mantiene la propiedad por acuerdo privado u otro tipo de documento. Nuevamente emergen notables diferencias territoriales a este respecto: existen cantones como Huamboya en los que apenas el 1 % tiene escritura pública, el 79 % no tiene documentos y el 21 % mantiene acuerdos privados. Por el contrario, en cantones como Antonio Ante o Pedro Moncayo, en los que en torno al 70 % de las parcelas tienen escritura pública.

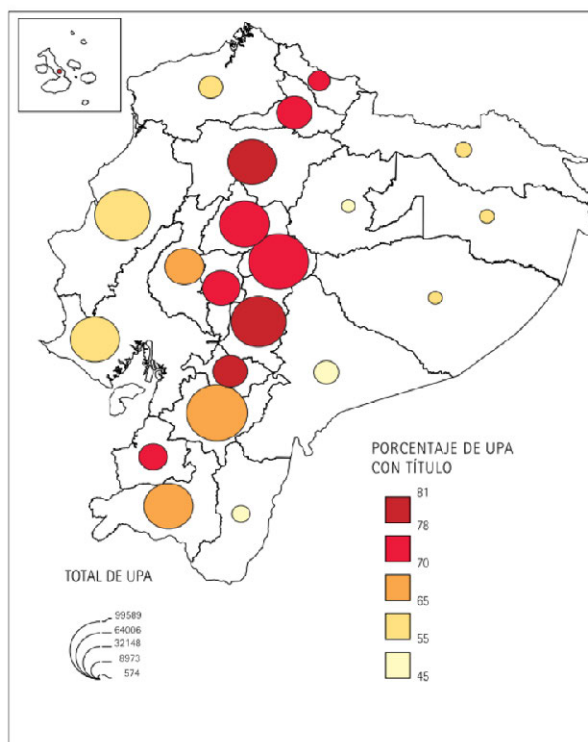


Figura 4. Localización de unidades de producción agropecuaria. Fuente: López Sandoval (2011) a partir del III Censo Nacional Agropecuario

La superficie objeto de acciones de legalización y saneamiento jurídico es similar y, a falta de priorización, los proyectos de regularización han de tener en cuenta en su alcance procedimientos, beneficiarios e instituciones diferenciadas para uno u otro, además de contemplar, la fuerte diferenciación territorial.

Los antecedentes bibliográficos que analizan la tenencia y las reformas agrarias de tierras en Ecuador marcan notables diferencias cantonales en formas de tenencia, niveles de regularización e incidencia de políticas previas de adjudicación y titulación (Franciscutti, 2002; Morales et al., 2010; López-Sandoval, 2011) e, incluso, la mayor parte de las aproximaciones al análisis de la tenencia mediante estudios de caso se hizo atendiendo a esta diferenciación territorial (Uquillas 1993; Ibarra y Ospina 1994; Gilces y Montenegro 2008; Brassel, Ruiz, y Zapatta 2008; SIPAE 2011).

Este último aspecto es relevante teniendo en cuenta que los proyectos de regularización se han realizado con un componente regional (selección de cantones a intervenir) y, al igual que los Proyectos de Desarrollo Rural Integral, no consideraron ni la cuestión de la tenencia de la tierra y las necesidades de regularización o saneamiento jurídico sino que en los 80 buscaban objetivos productivistas orientados a explotaciones viables y desde los 90 han seguido una lógica neoliberal de políticas asistencialistas a los más pobres (Martínez, 2002).

#### IV.II. PATH-DEPENDENCE: MARCO INSTITUCIONAL Y JURÍDICO

La situación de tenencia comentada es el resultado de asiduos cambios del marco normativo (y modelos macroeconómicos) que han comprometido la institucionalidad de la diversidad de fórmulas que adoptan los derechos de propiedad en Ecuador (figura 5), tal y como recoge la actual Ley Orgánica de Tierras y Territorios Ancestrales. Estos mismos cambios han complejizado el mapa de protocolos e instituciones con algún rol en la adjudicación, titulación, saneamiento y registro de

derechos. Ante estas dos cuestiones se considera relevante el análisis detallado del marco jurídico e institucional a ojos de la teoría de la economía institucional del “path-dependence” (North, 1991) por la cual el resultado de un proceso depende de la entera secuencia de decisiones tomadas por los actores y no sólo de las condiciones del momento.

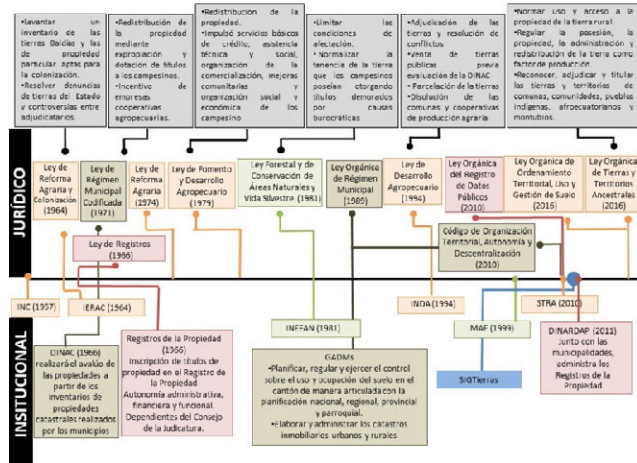


Figura 5. Línea de tiempo de la evolución jurídica e institucional de la gestión de tierras rurales.

Los antecedentes históricos de tenencia de la tierra consolidaron hasta mediados del s.XX la teoría del complejo latifundio-minifundio en el que las haciendas de las costa y sierra tenían a su disposición grandes extensiones de tierra trabajadas por campesinos asalariados y minifundistas con acceso a una limitada superficie de mala calidad y sobreexplotada para atender a sus necesidades básicas (Francescutti, 2002). El primer censo agropecuario del país en 1954 muestra como en la sierra y costa las parcelas de más de 500 ha representan el 0.3 y 0.4 % de las parcelas pero el 48,3 y 41,4 % de la superficie, respectivamente (Morales, 2000).

Los objetivos de las dos Reformas Agrarias (1964, 1974) eran la redistribución de la propiedad expropiando y dotando de títulos a los campesinos. El Instituto Ecuatoriano para la Reforma Agraria y Colonización (IERAC) que entre 1964-1973 (primera reforma) adjudicó 704.363 ha y entre 1973-1980 (segunda reforma), 1.447.506 ha (se incluyen en estas cifras los procesos de reforma agraria y de colonización). La suma de estas cifras representa casi un 30 % de la superficie relacionada con actividades agrícolas y pecuarias, localizadas sobre todo en la sierra y costa (Morales, 2000). Aún así, si se compara lo actuado con lo acontecido en otros países de la región, Ecuador está entre los países de menor acción redistributiva (Chiriboga, 1999).

Las dos leyes de Desarrollo Agrario (la Ley de Fomento y Desarrollo Agropecuario de 1979 y, sobre todo, la Ley de Desarrollo Agropecuario de 1994) supusieron un punto de inflexión en las tendencias de reestructuración y titulación pues redujeron las condiciones de afectación, de donde la necesidad de saneamiento de los títulos de las tierras ocupadas y la adjudicación y titulación de las tierras de expropiación acumuladas como propiedad, ahora del Estado, antes de las haciendas. El Instituto Nacional de Desarrollo Agrario (INDA), en reemplazo del IERAC, entre 1996-1999, entregó bajo todas las modalidades de regularización 6.337 títulos (124.182 ha) y benefició a más de 16.000 personas. A pesar de ello, el espíritu de la Ley - garantizar la propiedad privada y promover su uso eficiente (promover parcelaciones, fomentar la libre transacción y di-

solver las comunas y cooperativas) - se consideró insuficiente por sí sólo para lograr su cometido (Southgate, Saá, y Strasma 1998). En concreto, según Francescutti (2002), “el problema de la seguridad en la tenencia de la tierra evolucionó en este período hacia la inseguridad jurídica establecida por las contradicciones y vaguedades en los distintos marcos jurídicos, la ausencia de un mecanismo eficiente de legalización y catastro y la presencia de conflictos de posesión en los predios ya adjudicados”.

La situación en el siglo XXI es diferente a la situación en los años 60 y 70 del siglo pasado: ya no existe una gran reserva de “tierras baldías” ni muchos latifundios clásicos (Brassel et al., 2008).

La Reforma Agraria y otras dinámicas de la globalización han reconducido el discurso del desarrollo agrario a nuevos retos a razón de los cambios habidos: las Unidades de Producción Agraria han aumentado de 344.234 a 842.882 entre 1954 y 2000 (López, Egúez y Salvador, 2008); entre 1952 y 2001 la población urbana del país pasó del 19% al 52% (INEC, 2002), pero aún el 26% de la población económicamente activa (PEA) total y el 60% de la PEA rural se ocupaba en actividades agropecuarias (Vázquez y Saltos, 2006); la superficie agrícola utilizada, de casi 6 millones de hectáreas en 1954 aumentó a 12,3 millones en el 2000 (López, 2004).

En la última década, los nuevos discursos y retos de la sociedad ecuatoriana entorno a la tenencia han evolucionado hacia temas como el problema del minifundio y/o fragmentación en las zonas de desarrollo agrario (Brassel et al., 2008; Chiriboga y others, 2009; Pascual, 2013), la concentración de la tierra por parte del agronegocio (Quevedo Ramírez, 2013; Daza Cevallos, 2015), la expansión de las zonas urbanas (Bolay et al., 2004; Clichevsky, 2006; Rose, 2006) o la conservación y servicios ambientales de los territorios y comunidades indígenas y ancestrales (Rosero et al., 2011; Sandoval Vásquez, 2015; Menacho Menacho, 2016). Estos discursos fueron plasmados en la Constitución de la República de Ecuador de 2008 (art. 321 reconoce la propiedad pública, privada, comunitaria, estatal, asociativa, cooperativa y mixta como formas de propiedad; el art. 57 reconoce y garantiza a las comunas, comunidades, pueblos y nacionalidades indígenas, afroecuatorianos y montubios los derechos colectivos de propiedad inalienables, inembargables e indivisibles que serán adjudicados gratuitamente; art.281 reconoce la soberanía alimentaria como un objetivo estratégico, el art. 282 prohíbe los latifundios y la concentración de tierras y el art. 319 alienta a la ordenación y gestión del suelo y producción agraria para satisfacer la demanda interna y la participación activa de Ecuador en el contexto de los mercados internacionales) a la espera de ser detallados por ley en materia de regularización, uso y gestión de la tierra.

Es importante dibujar todo este mapa legislativo e institucional pues el éxito general de los programas de regularización y, por ende, el acceso a crédito y productividad agraria dependerán de la simplificación de los protocolos y la extrema coordinación del amplio número de instituciones implicadas.

**IV.III. REGULARIZACIÓN DE LA TIERRA Y ACCESO A CRÉDITO: MITO Y REALIDAD**

*IV.III.I. Características de la propiedad*

La primera de las causas enunciadas por Lawry et al. (2014) sobre la baja tasa de acceso a crédito aún en situaciones de seguridad en la tenencia son las características de la propiedad. En particular, las pequeñas explotaciones de población

rural con escasos recursos pueden resultar poco atractivas para ejercer el papel de garantía ante las instituciones financieras con independencia de la situación de tenencia.

Las reformas agrarias de Ecuador pretendían romper el binomio latifundio-minifundio que caracterizó la estructura de la propiedad. El propósito de redistribución llevó aparejada la emergencia de un alto índice de fragmentación de la propiedad en aumento por las sucesivas parcelaciones de las herencias (Tabla II). Ésta es sin duda una de las preocupaciones de la agricultura campesina (Jordán 2003; Nieto-Cabrera 2004; Brassel, Herrera, y Laforge 2008; Chiriboga y others 2009; Pascual 2013; Hidalgo 2013).

**TABLA II.**  
Necesidades de legalización y regularización en el Ecuador.  
Fuente: Censos Agropecuarios en Brassel et al. (2010).

Número de propiedades						
Explotaciones	Censo 1954	Censo 1974	Censo 2000	Censo 1954 %	Censo 1974 %	Censo 2000 %
Menos de 5 ha.	251686	346877	535309	71,1	66,8	63,5
De 5 a 20 ha.	67650	96360	176726	19,1	18,6	21,0
De 20 a 100 ha.	27742	64813	111290	7,8	12,5	13,2
Más de 100 ha.	7156	11091	19557	2,0	2,1	2,3
<b>Total</b>	<b>354234</b>	<b>519141</b>	<b>842682</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Hectáreas						
Explotaciones	Censo 1954	Censo 1974	Censo 2000	Censo 1954 %	Censo 1974 %	Censo 2000 %
Menos de 5 ha.	432200	538700	774225	7,2	6,8	6,3
De 5 a 20 ha.	565800	935300	1706794	9,4	11,8	13,8
De 20 a 100 ha.	1138700	2664700	4614436	19,0	33,5	37,3
Más de 100 ha.	3863000	3810800	5260375	64,4	47,9	42,6
<b>Total</b>	<b>5999700</b>	<b>7949500</b>	<b>12355830</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Índice Gini	0,86	0,85	0,80
-------------	------	------	------

La figura 6 muestra que en torno al 70 % son propiedades de menos de 1 hectárea con título (con o sin necesidad de saneamiento jurídico). Se apunta aquí que las parcelaciones y reparto de herencias no formalizadas a la fecha podrían revelar índices de fragmentación aún mayores a los indicados, siendo esta una limitación al desarrollo productivo de las pequeñas explotaciones familiares y un reto de las políticas agrarias futuras.

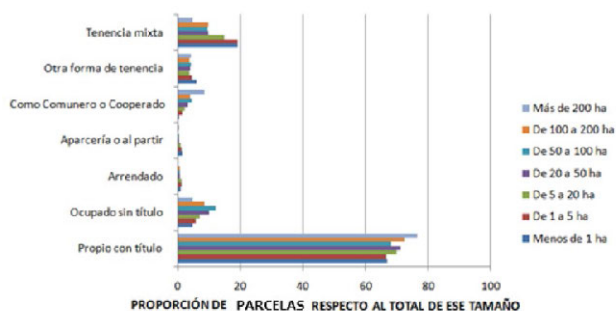


Figura 6. Proporción de superficie agraria según tamaño de las parcelas y situación de tenencia. Fuente: elaboración propia a partir de los datos del III Censo Nacional Agropecuario

Otro de los aspectos habitualmente recogidos en los estudios de tenencia de la tierra, especialmente en las economías de transición, es la proporción de tierras en régimen de tenencia indirecto y su relación con la inversión y productividad de los hogares, ambas vinculadas con el acceso a crédito (Deininger y Jin, 2002; Teklu y Lemi, 2004; Zhang et al., 2004; Vranken y Swinnen, 2006; Masterson, 2007). El III Censo Agrario y en las Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua muestran su baja representatividad como forma de tenencia (figura 7). En particular, ésta es una forma de tenencia que algunos autores definen como impacto positivo de la regularización en las zonas de costa, donde los cultivos de exporta-

ción inducirían un mercado formal de arrendamiento dinámico (Francescutti, 2002) y los datos de Línea base del proyecto SIGTierras revelan que el 15 % de las tierras trabajadas por los hogares son gestionadas en régimen de arrendamiento (SIG-Tierras, 2016).



Figura 7. Sistemas de tenencia. Fuente: Elaboración propia a partir del III Censo Nacional Agropecuario - 2000

Ambas cuestiones, tamaño de parcelas e importancia de los regímenes de tenencia indirectos, son relevantes a la hora de valorar el impacto de la regularización en el acceso a crédito por parte de los hogares pues: 1) la existencia mayoritaria de pequeñas parcelas y/o explotaciones pueden resultar poco atractivas para ejercer el papel de garantía ante las instituciones financieras con independencia de la situación de tenencia y 2) las dificultades de acceso a crédito para mejora técnica o ampliación territorial de la explotación debido al pequeño tamaño de las parcelas pueden promover los regímenes de tenencia indirectos como un mecanismo alternativo de acceso a la tierra. Esta última implicación ha sido observada especialmente en las economías de transición (K. W. Deininger y Jin 2002; Zhang, Qingguo, y Xu 2004; Masterson 2007).

#### IV.III.II. Tipología de instituciones de crédito

Derivado de las características de las propiedades, la segunda causa identificada por Lawry et al. (2014) sobre la baja tasa de acceso a crédito aún en situaciones de seguridad en la tenencia es la tipología de las instituciones de crédito, pues las instituciones informales locales de ahorro y préstamo se basan en el capital social y no emplean activos fijos como garantía. Kerekes y Williamson (2010) indicaron como posible motivo para la falta de relación entre la seguridad en la tenencia y el acceso a crédito en Perú a que muchos préstamos gubernamentales y privados aceptaban otras formas de garantía además de los títulos de propiedad.

Según los resultados de la Estadística de Condiciones de Vida (INEC), en torno a un 10 % de los hogares rurales con actividades agropecuarias tienen solicitado un crédito, fundamentalmente para la compra de animales y materias primas, aunque en la amazonía es habitual que se destine a la compra de vehículos o maquinaria (Figura 8).

Las instituciones a las que recurrieron son instituciones privadas y, en el caso de la costa, predominantemente a familiares o amigos (figura 9). El respaldo mediante terrenos, en montos promedio, sólo es mayoritario en la sierra. En la costa y la amazonía es más frecuente el respaldo mediante maquinaria o vehículos.

Hogares con actividades agropecuarias que obtuvieron crédito							
CRÉDITO		NACIONAL	URBANO	RURAL	COSTA	SIERRA	AMAZONÍA
Hogares que obtuvieron préstamos	%	7,9%	3,3%	9,5%	9,2%	5,6%	3,6%
	Hogares	36.677	12.027	85.750	66.625	33.666	3.088
Hogares que no obtuvieron préstamos	%	92,1%	96,7%	90,5%	90,8%	94,4%	96,4%
	Hogares	1.195.932	378.902	818.089	559.211	554.254	31.520

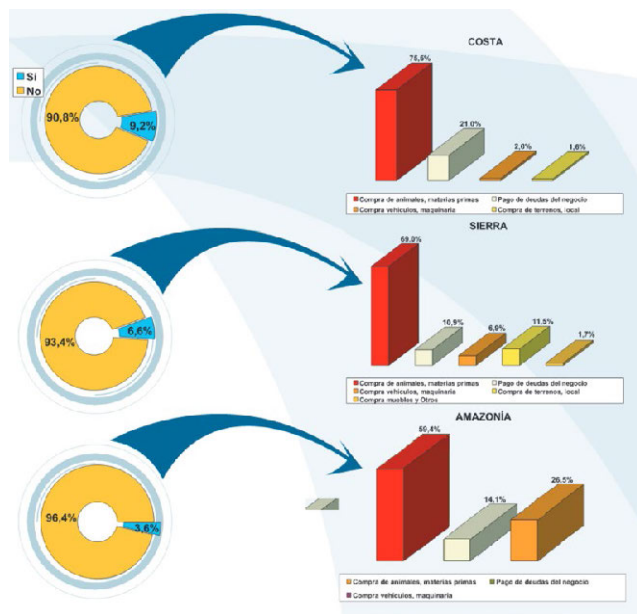
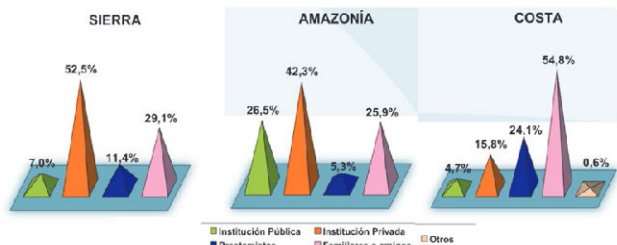


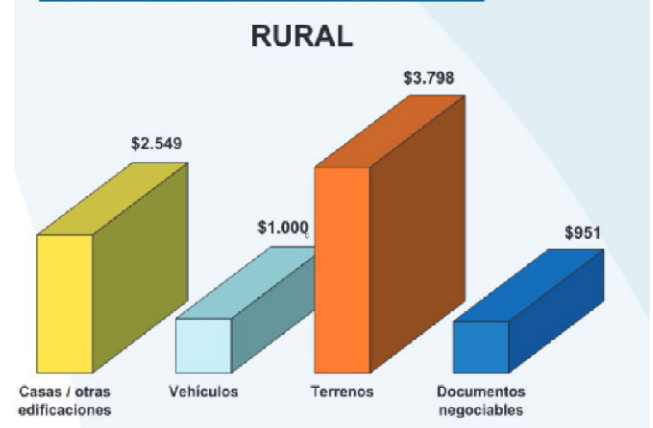
Figura 8. Hogares con actividades agropecuarias que obtuvieron crédito por región.

**Persona o Institución que otorgaron crédito en dinero para las actividades agropecuarias a nivel nacional y por área**

PERSONAS O INSTITUCIONES	NACIONAL	URBANO	RURAL
Instituciones Públicas	% Hogares 6,5%	% Hogares 12,7%	% Hogares 5,2%
Instituciones Privadas	% Hogares 31,5%	% Hogares 43,0%	% Hogares 29,4%
Prestamistas	% Hogares 18,4%	% Hogares 1,8%	% Hogares 19,6%
Familiares o amigos	% Hogares 43,6%	% Hogares 32,9%	% Hogares 45,4%
Otros*	% Hogares 0,3%	% Hogares 0,4%	% Hogares 0,4%



**Principales garantías según montos promedios de crédito en dinero de las actividades agropecuarias**



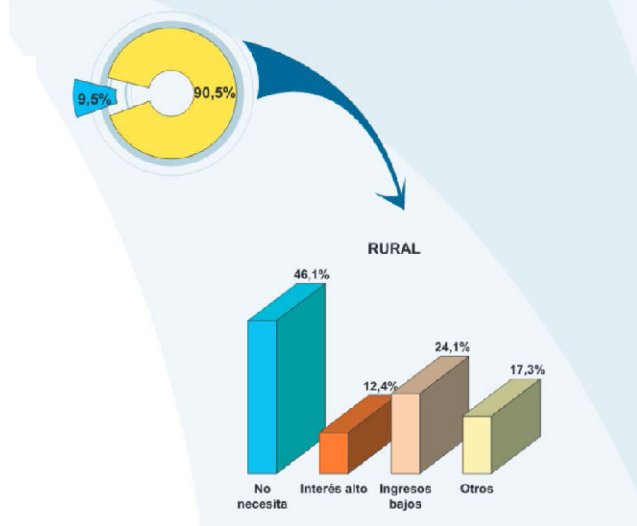
**Principales garantías según montos promedios de crédito en dinero de las actividades agropecuarias por región**



Figura 9. Composición de los organismos o personas que otorgan crédito. Fuente: Encuesta Condiciones de Vida (INEC-ECV, 2006)

Los reportes disponibles en los boletines de la Superintendencia de Economía Popular y Solidaria - SEPS (SEPS, 2016), se puede observar (figura10), que la mayor parte de las organizaciones (cooperativas) registradas en las SEPS, pertenece al grupo de producción y proceden del sector rural.

**Razones por que los hogares no pidieron crédito en dinero para las actividades agropecuarias**



Distribución por grupo de actividad económica

Grupo	%	Rural	Urbano
Producción	58,5%	91%	9%
Servicios*	37,6%	56%	44%
Vivienda	2,6%	47%	53%
Consumo	1,3%	44%	56%

Figura 10. Tipo de organizaciones del sector de la economía popular y solidaria. Fuente: Boletín # 3 SEPS, 12 de septiembre de 2016.

Durante 2013, 2014 y 2015, el sector no financiero de la economía popular y solidaria registró ingresos por USD 2.357 millones, por venta de bienes y/o servicios de las organizaciones (SEPS, 2016), con una tendencia de crecimiento que se puede observar en la tabla III.

**TABLA III.**

Ingresos reportados del sector no financiero de la economía popular y solidaria. Fuente: Boletín # 3 SEPS, 12 de septiembre de 2016

AÑO FISCAL	NÚMERO DE ORGANIZACIONES QUE REPORTAN	INGRESOS
2013	4.786	\$675.112.278,46
2014	4.857	\$788.942.528,54
2015	5.089	\$893.675.947,79

Fuente: Formulario 101 - SRI

El acceso a crédito a través de están cooperativas se respalda por otras posesiones, no necesariamente la tierra, y ésta tampoco es necesaria para el acceso a programas de fomento de la mejora y/o aumento de la productividad agraria de pequeños campesinos.

A la vista de estos datos se constata que en la economía de las pequeñas explotaciones ecuatorianas se confirma lo que en otras economías de América Latina: los títulos son innecesarios pues los medios de acceso a crédito de los pequeños productores permiten avalar el préstamo con otros bienes y el acceso a programas de productividad agraria tampoco los exigen como requisito (Larson et al., 1999).

De esta forma, el acceso a crédito a través de canales formales, no se ve afectado por cambios en la situación de tenencia.

#### IV.III.III. Rentas de las explotaciones y costos de regularización

Finalmente, el hecho de que los costos de transacción derivados del acceso a crédito por canales formales a través de la titulación de predios adopten cuantías muy altas en relación a la rentabilidad de los hacendados o al valor de la tierra es la tercera de las argumentaciones por las cuáles la seguridad en la tenencia puede no ir pareja de mayores nivel de acceso a crédito (Lawry et al. 2014).

Es necesario introducir en este apartado el nivel de registro de las parcelas de rústica en los registros de propiedad (figura 11) y las razones que los propietarios y poseionarios alegan para no emprender o completar la regularización a niveles que permitan emplear los títulos de propiedad como aval crediticio (figura 12).

¿Está inscrita esta parcela en notaría, Registro de la propiedad, o no está inscrita? (% del total de parcelas con documentos de tenencia)

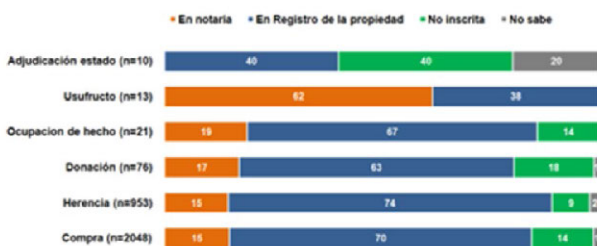


Figura 11. Porcentaje de parcelas con documentos de tenencia según el mecanismo de acceso a la propiedad. Fuente: Estudio de Línea Base del Proyecto SIGTierras (2016)

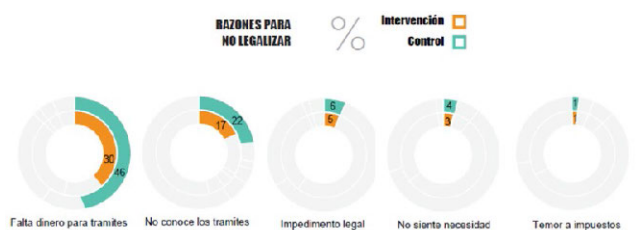


Figura 12. Razones para no legalizar alegadas por los propietarios y poseionarios de la tierra. Fuente: Estudio de Línea Base del Proyecto SIGTierras (2016)

Las fuentes bibliográficas consultadas revelan que los niveles más bajos de inscripción se dan en las tierras adjudicadas por el estado y no tanto en las transferencias y transmisiones de derechos de propiedad futuros. Asimismo, se constata que la falta de recursos y desconocimiento de los trámites son las causas mayoritarias para la obtención de un título como aval crediticio.

La eficiencia de los protocolos institucionales de regularización, se cuantifican en términos de costos monetarios y tiempo y complejidad de los procesos de actualización de los registros de propiedad.

Francescutti (2002) expone que el análisis del tiempo que toma llevar a cabo un trámite de titulación de tierras bajo los protocolos del antiguo INDA es de: 404 días para adjudicación de entrega individual, 463 para adjudicación de entrega colectiva, 181 días para un convenio colectivo de entrega individual y 151 para titulación colectiva mediante convenio con entrega masiva.

Francescutti (2002) también recoge la complejidad del Procedimiento de Titulación de Tierras del INDA (actual STRA) en el que se identifican 15-20 pasos con, al menos, cinco instituciones diferentes implicadas:

- Presentación del cliente o interesado de la documentación requerida por el INDA en la Delegación o Distrito de la institución;
- Ingreso de la carpeta con documentación y asignación de responsable en la Delegación o Distrito;
- Inspección de campo por parte del técnico responsable de la Delegación o Distrito, con gastos cubiertos por el interesado;
- Revisión del expediente y oficio del técnico responsable en el Departamento de Legalización de la Delegación o Distrito;
- Envío al INDA Matriz, ingreso en el Archivo Central y distribución para su procesamiento;
- Revisión, validación y aprobación de requisitos en la Dirección de Trámite de Legalización de Tierras;
- Envío de documentación (con firma del Director Ejecutivo) a la Dirección Nacional de Avalúos y Catastro (DINAC);
- Avalúo del predio por la DINAC y comunicación oficial al INDA Matriz
- Ingreso del oficio sobre avalúo al Archivo Central del INDA
- Cálculo de cobro y expedición de oficio o memorando de cobro por parte de la Dirección de Trámite de Legalización de Tierras;
- Recepción de pago y elaboración de providencia de adjudicación por parte de la Dirección de Trámite de Legalización de Tierras;
- Revisión de la providencia de adjudicación por parte de la Dirección Ejecutiva
- Firma de la providencia de adjudicación y comunicación a la DINAC - DINAC procesa información sobre adjudicación;
- Entrega del título al interesado por parte de la Delegación o Distrito de la institución;
- Protocolización del título con notario público por el interesado;
- Registro del título por parte del interesado en el Registro de la Propiedad del Cantón;
- Envío de copia del título certificado e inscrito al Archivo Central de la institución.

En lo referente a los procesos requeridos para el trámite de los expedientes civiles a instancia de parte, la propia Guía práctica de Orientación Legal: Requisitos y pasos para perfeccionar legalmente la tenencia de tierras rurales privadas del proyecto SIGTierras (figura 13) es prueba de la complejidad (en cuánto a trámites y a instituciones).

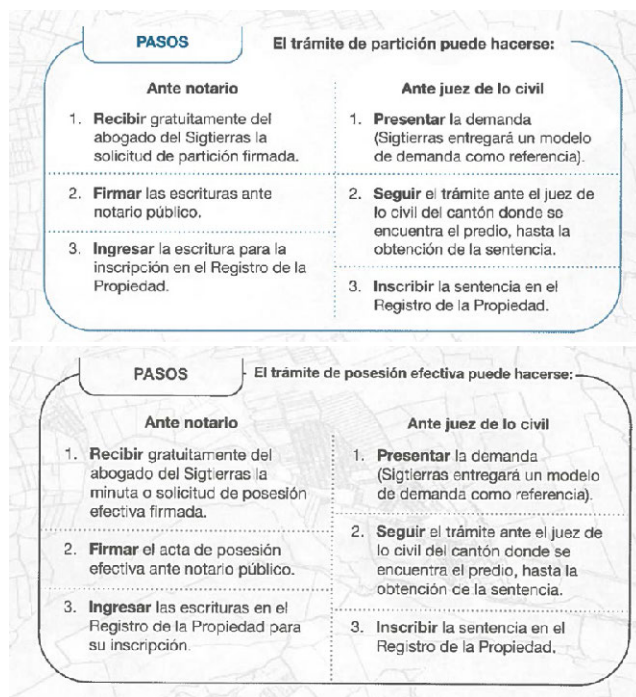


Figura 13: Extractos del proceso de regularización. Fuente: Guía práctica de Orientación Legal (SIGTierras, 2013)

Otro aspecto a tener en cuenta, además de los costos de tiempo que exige la regularización, es el costo monetario que representa la actualización del título. Por ejemplo, se estima que para un predio rural valorado en \$5.000,00 los costos de regularización asociados a un Juicio de Prescripción adquisitiva de dominio ascienden a \$1.215 en Cuenca y \$1.000 en Colta o Chunchi. Teniendo en cuenta que uno de los fines de los títulos es el de aval crediticio esto implica que es necesaria una inversión previa del 20 % del valor del predio para poder emplearlo con dicho propósito.

Una forma de constatar que esta problemática es habitual en muchas regiones, no sólo propia de Ecuador, es el número de iniciativas incluidas en los proyectos de regularización para reducir la complejidad de los trámites, documentación e instituciones implicados en la regularización de la propiedad son:

- El Programa TITULAR de Colombia pretendía desarrollar una nueva metodología que fuera más eficiente, simplificara trámites y redujera los tiempos y costos de los procedimientos (Conroy et al., 2014).
- El Registro Predial de Pueblos Jóvenes y Urbanizaciones Populares estaba dirigido a servir a las personas de bajos ingresos de la zona urbana de Lima y eliminaba el requisito de contar con escrituras notariales y lo substituía con formularios registrales sencillos que podían ser firmados por un notario o abogado certificado (Conroy et al., 2014).
- El Decreto Legislativo N° 667 - Ley del registro de predios rurales - de Perú simplificaba los trámites de registro de la propiedad.
- La Ley 24 de 2006 en Panamá establece la regularización de la tenencia como de interés de orden público, permite al Estado titular de oficio en las áreas declaradas "zonas de regularización" y además simplifica notoriamente los trámites requeridos para la titulación y el registro.

## V. CONCLUSIONES

Es constatable, en el caso ecuatoriano, que la regularización de tierras rurales aún sigue siendo una tarea pendiente. La información catastral y la ficha de tenencia de proyectos de administración de tierras recientes como el PRAT o SIGTierras presentan un alto potencial como diagnóstico de las necesidades de regularización a nivel cantonal. Esta información, así como las referencias censales previas, indican que el volumen de adjudicaciones y titulación a instancias gubernamentales es similar al volumen de tierras con necesidad de saneamiento jurídico a instancia de parte de los títulos madre otorgados con anterioridad. Esta situación es consecuencia de convulsos marcos normativos desde los años 60 y un complejo marco institucional para la administración y gestión de la rica y singular diversidad de formas de tenencia pertinentemente identificadas y protegidas por el marco normativo actual (Ley Orgánica de Tierras y Territorios Ancestrales).

Al margen de la propia generación y dotación a los propietarios y posesionarios de títulos de propiedad como aval crediticio existen en Ecuador otras limitaciones sistémicas identificadas por la bibliografía internacional que constriñen el potencial de la seguridad de la tenencia como motor de acceso a crédito (articulación del mercado de tierras y aumento de la productividad):

- En torno a un 70 % de las parcelas tienen menos de 1 ha. Esta existencia mayoritaria de pequeñas parcelas y/o explotaciones puede resultar poco atractiva para ejercer el papel de garantía ante las instituciones financieras con independencia de la situación de tenencia.
- Las instituciones de crédito a las que mayoritariamente recurren los hogares rurales son instituciones privadas y, en el caso de la costa, predominantemente a familiares o amigos. Asimismo, el respaldo mediante terrenos, en montos promedio, sólo es mayoritario en la sierra. En la costa y la amazonía es más frecuente el respaldo mediante maquinaria o vehículos.
- Bajo el complejo esquema actual de protocolos e instituciones implicadas en la actualización de los títulos, los costos de regularización suponen un 20 % del valor de la finca (estimaciones previas). Por ello, la adquisición de los mismos supone una notable inversión previa para el cual sería preciso, incluso, acceder al propio crédito.

En este contexto, convendría, en el diseño de futuros proyectos de regularización de tierras en el Ecuador, proponer actividades que tengan en cuenta la complejidad y costo del proceso de regularización y actualización de los títulos pues, aunque el proyecto dote de títulos de forma mediante financiación específica la sostenibilidad futura del sistema de titulación seguirá comprometida.

Finalmente, resaltar el hecho de que la seguridad en la tenencia es uno de los elementos que genera productividad y competitividad agropecuaria, no obstante, habría que apoyarla con algunas políticas y reformas que incluyen los sistemas de acceso a crédito adaptados a las necesidades de los productores, procesos de regularización simples y eficientes y políticas de transferencia tecnológica no paternalistas.

## REFERENCIAS

- Acevedo, R. y Delgado, J. 2002. El papel de los bancos de desarrollo agrícola en el acceso al crédito rural. En: Banco Interamericano de Desarrollo, Departamento de Desarrollo Sostenible, Conferencia: Desarrollo de las Economías Rurales en América Latina y el Caribe: Manejo Sostenible de los Recursos Naturales, Acceso a Tierras y Finanzas Rurales. Fortaleza, Brasil. Auspiciado por el Gobierno de Alemania. Vol. 7.
- Besley, T. 1995. «Property Rights and Investment Incentives: Theory and Evidence from Ghana.» *Journal of Political Economy* 103 (5): 903-37.
- Bicciato, F. 2002. Microfinanzas en países pequeños de América Latina: Bolivia, Ecuador y el Salvador. CEPAL.
- BID (2012). «Ecuador, Estrategia País», Documento del Banco Interamericano de Desarrollo. Washington.
- BID, 2009. Informe de Terminación de Proyecto: Programa de Regularización y Administración de Tierras Rurales (PRAT).
- Brassel, F., Herrera, S. y Laforge, M. 2008. Reforma agraria en el Ecuador?: viejos temas, nuevos argumentos.
- Brassel, F., Ruiz, P. y Zapatta, A. 2010. La estructura agraria en el Ecuador: una aproximación a su problemática y tendencias. Reforma agraria en el Ecuador.
- Bruce, J.W. y Montaño, C.C. 2000. Conceptos sobre tenencia de la tierra. Land Tenure Center, University of Wisconsin-Madison.
- Bolay, J.-C., Rabinovich, A. y André de la Porte, C. 2004. Interfase urbano-rural en Ecuador: hacia un desarrollo territorial integrado. [http://infoscience.epfl.ch/record/114256/files/CahierLaSUR05\\_interfase\\_ecuador.pdf](http://infoscience.epfl.ch/record/114256/files/CahierLaSUR05_interfase_ecuador.pdf)
- Carter, M.R. y Chamorro, J.S. 2000. Estudio de las dinámicas de la
- Chiriboga, V. 2009. 30 años después: una reflexión sobre los estudios rurales y agrarios en Ecuador (Debate Agrario-Rural).
- Chiriboga, M. y Wallis, B. 2010. Diagnóstico de la pobreza en Ecuador y respuestas de Política Pública. Santiago de Chile. RIMISP-Centro Latinoamericano para el Desarrollo Rural.
- Clichevsky, Nora. 2006. Regularizando la informalidad del suelo en América Latina y el Caribe. Una evaluación sobre la base de 13 países y 71 programas. CEPAL - SERIE Manuales 50. Santiago de Chile: Publicación de las Naciones Unidas.
- Conroy, H., Ramos, J., Tang, L. y Ramirez-Goldin, A. 2014. proyectos de regularización y administración de tierras: evaluación comparativa. Inter-American Development Bank. [https://publications.iadb.org/handle/11319/6389?scope=123456789/11,thumbnail=true,rpp=5,page=3,group\\_by=none,etal=0](https://publications.iadb.org/handle/11319/6389?scope=123456789/11,thumbnail=true,rpp=5,page=3,group_by=none,etal=0).
- Daza Cevallos, E. 2015. Más agronegocio, menos Soberanía Alimentaria. Instituto de Estudios Ecuatorianos y Observatorio del Cambio. Rural.<http://porlatierra.org/docs/9aeb3186f1a965cae3d134a600ede652.pdf>.
- Deininger, K. y Feder, G. 2001. Land institutions and land markets. *Handbook of agricultural economics*, 1: 288-331.
- Deininger, K. y Feder, G. 2009. Land registration, governance, and development: Evidence and implications for policy. *The World Bank Research Observer*, 24 (2): 233-266.
- Deininger, K. y Jin, S. 2003. Land sales and rental markets in transition: evidence from rural Vietnam. *World Bank Policy Research Working Paper*, (3013).
- Deininger, K., Hilhorst, T. y Songwe, V. 2014. Identifying and addressing land governance constraints to support intensification and land market operation: Evidence from 10 African countries. *Food Policy*, 48: 76-87.
- Deininger, K., Savastano, S. y Carletto, C. 2012a. Land Fragmentation, Cropland Abandonment, and Land Market Operation in Albania. *World Development*, 40 (10): 2108-2122.
- Deininger, K., Selod, H. y Burns, A. 2012b. The Land Governance Assessment Framework: Identifying and monitoring good practice in the land sector. World Bank Publications.
- Deininger, K., Zegarra, E. y Lavadenz, I. 2003. Determinants and impacts of rural land market activity: evidence from Nicaragua. *World Development*, 31 (8): 1385-1404.
- Deininger, K.W. 2003. Land policies for growth and poverty reduction. 26384. Washington: World Bank and Oxford University Press.
- Deininger, K.W. 2010. Innovations in land rights recognition, administration, and governance. World Bank Publications.
- Deininger, K.W. y Jin, S. 2002. Land rental markets as an alternative to government reallocation?: Equity and efficiency considerations in the Chinese land tenure system. World Bank Publications.
- Edouard, F. y Jarquin, M. 2015. «Regularización, saneamiento y titulación». Herramienta de Evaluación PAT - Modulo 2 - Instituciones Administración de Tierras - IAT. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <http://www.fao.org/3/a-av202s.pdf>.
- Feder, G. 1999. Land administration reform: economic rationale and social considerations. UN FIG Conference on Land Tenure and Cadastral Infrastructures for Sustainable Development, Melbourne, Australia. 1999:
- Feder, G. y Nishio, A. 1998. The benefits of land registration and titling: economic and social perspectives. *Land use policy*, 15 (1): 25-43.
- Foltz, J., B. Larson, y R. López. 2000. Land Tenure, Investment, and Agricultural Production in Nicaragua. *Development Discussion Paper* 738. Harvard Institute for International Development. <http://www.cid.harvard.edu/hiid/738.pdf>.
- Francescutti, D. 2002. Regularización de la tenencia de tierras: evolución, costos, beneficios y lecciones. El caso del Ecuador». *FAO Investment Centre Occasional Paper Series* 13: 97.
- Gilces, A. y Montenegro, F. 2008. Tenencia de la tierra en 12 comunidades en la provincia de Manabí. Reforma agraria en el Ecuador: viejos temas, nuevos argumentos, 103.
- Hidalgo, F. 2013. Sembrando la soberanía alimentaria en Ecuador». *Comercio y Crecimiento*, 37.
- Ibarra, H. y Ospina, P. 1994. Cambios agrarios y tenencia de la tierra en Cotopaxi. Vol. 3. Fondo Ecuatoriano Populorum Progressio.
- INEC. 2016. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Reporte de Pobreza y desigualdad. Marzo de 2016



- Jordán, F. 2003. Reforma agraria en Ecuador. Ponencia presentada al Seminario Internacional Resultados y perspectivas de las reformas agrarias y los Movimientos Indígenas y Campesinos en América Latina, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz.
- Kerekes, C, y C. Williamson. 2010. «Propertyless in Peru, Even with a Government Land Title». *The American Journal of Economics and Sociology* 69 (3): 1011-33.
- Lawry, Steven, Cyrus Samii, Ruth Hall, Aaron Leopold, Donna Hornby, y Farai Mtero. 2014. *The impact of land property rights interventions on investment and agricultural productivity in developing countries: a systematic review*. Oslo, Norway: Campbell Systematic Reviews.
- López, M.F.; Egüez, D. y Salvador, G. 2008. Cambios en la estructura el paisaje agrario hacia fines del siglo XX: Análisis multi-temporal de cartografía estadística sobre tenencia de tierra, uso de suelo y producción agropecuaria 1954, 1974 y 2001. En: Mejía, M. (Ed.): Reporte de investigación: Base de Datos II. Documento no publicado. Quito. PUCE, 61-180.
- López Sandoval, María Fernanda. 2011. Tenencia, seguridad y regularización de tierras rurales en el Ecuador: entre el problema agrario y los incentivos para la conservación. *Revista de la Escuela de Ciencias Geográficas PUCE* 3: 7-17.
- MAGAP. 2016. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca. *La Política Agropecuaria Ecuatoriana: Hacia el desarrollo territorial rural sostenible 2015-2025 I Parte*.97 -100.
- Martínez, L. (2002). Desarrollo rural y pueblos indígenas: las limitaciones de la praxis estatal y de las ONG en el caso ecuatoriano. *Ecuador Debate*, 55.
- Masterson, T. 2007. Land rental and sales markets in Paraguay. *The Levy Economics Institute Working paper*, n.o 491.
- Morales, M., Naughton-Treves, L. y Suárez, L. 2010. Seguridad en la tenencia de la tierra e incentivos para la conservación de los bosques. ECOLX.Menacho Menacho, L.A. 2016. El derecho de los pueblos indígenas a no ser desplazados de sus tierras ancestrales en la legislación nacional.
- Nieto-Cabrera, C. 2004. El acceso legal a la tierra y el desarrollo de las comunidades indígenas y afroecuatorianas: la experiencia del PRODEPINE en el Ecuador. *Land Reform 2004*: 96-109.
- North, D.C. 1990. *Institutions, institutional change and economic performance*. Cambridge university press. Quevedo
- Ramírez, T. 2013. Agroindustria y concentración de la propiedad de la tierra: Elementos para su definición y caracterización en el Ecuador. OBSERVATORIO DEL CAMBIO RURAL - OCARU.
- Pascual, F.G. 2013. El sector agrario del Ecuador: incertidumbres (riesgos) ante la globalización. *Íconos-Revista de Ciencias Sociales*, (24): 71-88.
- Rose, S.E. 2006. Tenure security and household labor decisions: The effect of property titling on labor force participation in urban Ecuador. <https://repository.library.georgetown.edu/handle/10822/556004>.
- Rosero, F., Carbonell, Y. y Regalado, F. 2011. Soberanía alimentaria, modelos de desarrollo y tierras en Ecuador. Quito, CAFOLIS, FES/ILDIS, OXFAM, UPS.
- Sandoval Vásquez, J.C. 2015. El Ecuador, original, volviendo a los orígenes: en busca de los principios del ordenamiento territorial ancestral. VII Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo, Barcelona-Montevideo, junio 2015, Departament d'Urbanisme i Ordenació del Territori. Universitat Politècnica de Catalunya. 2015.
- Sanchez-Paramo, C. 2005. Pobreza en Ecuador. Breve, Banco Mundial.
- SEPS. 2016. Boletín # 3 de la Superintendencia de la Economía Popular y Solidaria (SEPS), 12 de septiembre de 2016
- SIGTierras. 2016. Una mirada a la realidad social, legal y económica al sector rural de 18 Cantones del Ecuador. Síntesis del estudio línea de base del Programa SIGTierras.
- SIPAE- Equipo Tierras. 2011. Atlas sobre la Tenencia de la Tierra en Ecuador. Quito - Ecuador: Sistema de Investigación sobre la Problemática Agraria en el Ecuador (SIPAE).
- De Soto, Hernando. 2000. *The mystery of capital: Why capitalism triumphs in the West and fails everywhere else*. 1a. New York: Basic Books.
- Soto Baquero, F. y Gómez, S. 2012. Dinámicas del mercado de la tierra en América Latina y el Caribe: concentración y extranjerización. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO).
- Soto, H. de. 2001. El misterio del capital: por qué el capitalismo triunfa en Occidente y fracasa en el resto del mundo.
- Southgate, J. A., Saá, C.M. y Strasma, J. 1998. Políticas agrarias en el Ecuador; evaluación 1990-1996. V. 1. Síntesis del estudio. Ministerio de Agricultura y Ganadería, Quito (Ecuador).
- Tejo, P. 2003. Mercados de tierras agrícolas en América Latina y el Caribe: una realidad incompleta. United Nations Publications.
- Uquillas, J. 1993. La Tenencia de la tierra en la Amazonía ecuatoriana. En: Bustamante, T. et al., Retos de la Amazonía, Quito, ILDIS, Abya-Yala, 61-94.
- Vázquez L. y Saltos, N. 2006. Ecuador, su realidad 2005-2006. Quito: C. Peralta.
- Vogelgesang, F. 1996. Los derechos de propiedad y el mercado de la tierra rural en América Latina. *Revista de la CEPAL*.
- World Bank. 2017. Indicadores del desarrollo mundial. Consultado: mayo de 2017.
- Zhang, Q., Ma Qy Xu X.. 2004. Development of land rental markets in rural Zhejiang: Growth of off-farm jobs and institution building. *The China Quarterly* 180: 1031-1049.



# Nomenclátor y SIG para la gestión de topónimos. Parroquia Sayausí, Cuenca-Ecuador

Cordero Farfán María Fernanda

Carrera de Historia y Geografía/  
Facultad de Filosofía, Letras y Ciencias de la Educación/Universidad de Cuenca  
Ciudad de Cuenca/Provincia del Azuay/Ecuador  
maria.cordero@ucuenca.edu.ec

## RESUMEN

No se dispone en Ecuador de un modelo oficial para la clasificación de topónimos. El trabajo que se presenta, elaboró un Nomenclátor y un Sistema de Información Geográfica de Topónimos de la parroquia Sayausí, Cantón Cuenca, Provincia del Azuay, Ecuador con un total de 373 georeferenciaciones que corresponde a sitios de interés histórico, geográfico y socio-cultural. Todos ellos cuentan con una ficha que detalla la información recogida durante el trabajo de campo, vinculada al SIG, lo que facilita las consultas y constituye material interesante para otras indagaciones al narrarse la historia de muchos lugares y su relación con el territorio. La investigación y los medios utilizados para el registro y análisis de los topónimos se fundamentaron en los principios y metodología de la Historia Oral, pues la mayoría de los nombres registrados corresponden a la lengua cañari, quichua o sus combinaciones que no tuvieron escritura. No obstante, también se empleó la escasa o casi inexistente documentación escrita así como: mapas, hojas topográficas y planos de distintas escalas y fechas. La información generada contribuye para la realización de una tarea indispensable en el país como es la “Normalización de Nombres Geográficos”. Si bien se trata de una sola parroquia, futuros proyectos podrían trabajar en áreas geográficas más grandes. Del mismo modo, sirven de referencia para la elaboración de otros estudios que implica la amplia temática de la toponimia. Contribuye a la planificación, por ser un instrumento para la localización y consulta sobre lugares que forman parte de la ordenación de los territorios.

Palabras clave: **topónimo, sistema de información geográfica SIG, nomenclátor, normalización de nombres geográficos.**

## ABSTRACT

*An official model for the classification of Toponyms (place-names) has not been developed in Ecuador. As such, the work that is presented elaborates a Gazetteer and a Geographical Information System of Toponyms of the Sayausí parish, Canton Cuenca, Province of Azuay, Ecuador, with a total of 373 georeferenciaciones corresponding to sites of historical, geographic and socio-cultural interest. All of them have a data sheet that details the information collected during the field work, linked to the GIS, which facilitates consultation and constitutes interesting material for other inquiries or research and at the same time narrating the history of many places and their relationship with the territory.*

*The research and the means used for the registration and analysis of place-names, were based on the principles and methodology of Oral History, as most of the names correspond to the Cañari language, Quichua or their combinations that had no written language. However, for this research some scarce written documentation has been used, such as: maps, topographic sheets and plans of different scales and dates.*

*The information generated and the results, contribute to the accomplishment of the indispensable task of "Normalization of Geographic Names" in the country. Considering that it is a single parish, the principles of this work could be applied to future projects in larger geographic areas, contributing to territory planning as an instrument for locating and consulting places that are part of the management of the territories.*

**Keywords:** toponym (place-name), geographic information system (GIS), gazetteer, normalization of geographic names

## I. INTRODUCCIÓN

Como es de conocimiento público, una de las tareas prioritarias del Instituto Geográfico Militar (IGM), es la generación y publicación de la Cartografía Nacional. En septiembre de 2.009, la referida institución elaboró la "Propuesta para la Creación de la Junta Nacional de Topónimos" en busca de la necesaria normalización que ayudaría a superar los innumerables problemas, entre ellos una serie de incoherencias en los nombres geográficos que provienen de fuentes cartográficas y documentos oficiales, los cambios efectuados a los nombres autóctonos e incluso la oficialización de nombres que no tienen arraigo (IGM, 2.009).

Desafortunadamente, lo antes referido quedó como simple propósito, toda vez que no ha existido continuación de una labor tan importante y esencial como es la de dotar al país de normas y procedimientos estandarizados para la recopilación en campo, el tratamiento, registro, oficialización, almacenamiento y difusión de los nombres geográficos normalizados.

Por carecer de estos instrumentos, se estimó necesario para el caso de la parroquia Sayausí, proceder al diseño de un Nomenclátor; esto es un catálogo ordenado de topónimos que contengan información sobre su ubicación georeferenciada, tipo de entidad geográfica y más datos que lleven a describir y definir cada uno de los topónimos que se analicen; sin que además, se deje a un lado, por su valor patrimonial inmaterial, la importancia del topónimo como herramienta discursiva.

Es preciso se considere que, el uso uniforme de los topónimos correctos, constituye elemento esencial de la cartografía y trascendente en la sociedad digital en la que nos encontramos inmersos y dentro de la cual consta los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Diseño y desarrollo que se muestra a continuación

## II MÉTODO

### NOMENCLÁTOR PARROQUIA SAYAUSÍ.

La elaboración de un Nomenclátor para la parroquia Sayausí, se enmarca dentro de las recomendaciones de las Conferencias de las Naciones Unidas sobre la Normalización de Nombres Geográficos, UNESCO, (2007) de la que el Ecuador forma parte. La norma internacional ISO19112 -espacio de referencias basado en nombres geográficos- define un esquema conceptual para las referencias espaciales con el uso de nombres geográficos y recomienda documentar un Nomenclátor con los aspectos que se desarrollan como ejemplo a continuación (Tabla I)

**TABLA I**

NOMENCLÁTOR, NORMA ISO 19112: PARROQUIA SAYAUSÍ. ESQUEMA CONCEPTUAL DE REFERENCIAS ESPACIALES

<b>NOMBRE DEL NOMENCLÁTOR</b>	Nomenclátor de Topónimos de la Parroquia Sayausí, Cantón Cuenca, Provincia del Azuay, Ecuador
<b>TEMA DEL QUE SE OCUPA</b>	Toponimia en General
<b>TERRITORIO QUE ABARCA</b>	Parroquia Sayausí, Cantón Cuenca, Provincia del Azuay, República del Ecuador. Área 301.573,57 Has, de esta 58.44 Has, corresponde al centro parroquial.
<b>ESCALA, O ESCALAS UTILIZADAS</b>	Las escalas utilizadas difieren: las hojas topográficas del IGM a 1: 50 000, el mapa de localidades, el parroquial y los de accidentes geográficos a 1: 125 000, todos estos en formato vectorial, más la imagen satelital de la zona en raster que permite un análisis fluido de la información.
<b>SISTEMA DE REFERENCIA UTILIZADO</b>	Sistema Geodésico Mundial 1984. (WGS84) Z17S
<b>SISTEMA DE COORDENADAS EMPLEADO</b>	Coordenadas Planas UTM (Universal Transformer de Mercator) X (Este) Y (Norte)
<b>FUENTE</b>	Cartas Topográficas, mapas y planos del IGM (Instituto Geográfico Militar del Ecuador) GAD de la ciudad de Cuenca y GAD de Sayausí.
<b>FINALIDAD Y FILOSOFÍA DEL NOMENCLÁTOR</b>	Es la recuperación y conservación de los topónimos, para que en una etapa posterior, sea el Municipio, el que a través de una ordenanza u otro mecanismo que estime conveniente, devuelva a la historia y al patrimonio de la zona los nombres originales. Otra, es la de narrar la historia que encierran muchos topónimos y su relación con el territorio. También está la de servir de referencia para estudios posteriores sobre toponimia y ser fuente entre otros para la localización y consulta en la gestión, planificación territorial, desarrollo de sistemas, centros de información y documentación entre otros.
<b>FUENTE</b>	UNESCO. (2007)
<b>ELABORACIÓN</b>	María Fernanda Cordero Farfán - febrero de 2016-

### DETALLE Y CLASIFICACIÓN

Por las características y naturaleza del área de estudio, se diseña una clasificación de topónimos que se ocupe tanto del origen lingüístico cuanto de su motivación temática.

Es necesario indicar que se examinaron una serie de clasificaciones, las más cercanas a nuestro interés fueron las elaboradas por Carmen Díaz Alayón que titula "La toponimia de

Canarias: Aportes Lingüísticos” del año 2013, la de Jairo Javier García Sánchez, “Atlas Toponímico de España” del año 2007, de las que se tomaron algunos nombres temáticos.

Fue difícil encontrar una denominación que englobe a los topónimos que hacen referencia a carreteras, vías, puentes, caminos, chaquiñanes, senderos, por lo que se toma un término muy usado en la actualidad, sobre todo en el campo de la Planificación Territorial y Urbana que es la “conectividad”, término que es aplicable en diversas especialidades y que figura en la vigésima segunda edición del diccionario de la Real Academia Española, “la capacidad de conectarse o hacer conexiones”, que para el tema que nos ocupa se refiere a conexiones o flujos entre los distintos lugares, sin importar la calidad del camino, su jerarquía, su uso o desuso. El Catálogo o Nomenclátor de topónimos de la parroquia Sayausí queda como sigue (Tabla II)

**TABLA II**  
NOMENCLÁTOR DE TOPÓNIMOS: PARROQUIA SAYAUSÍ, CANTON CUENCA, AZUAY, ECUADOR.  
ESTRUCTURA

<b>Nombre de la Parroquia:</b>
<b>Código de la Parroquia:</b> es el identificador que enlaza a otras bases de datos
<b>Nombre actual.</b>
<b>Nombre anterior</b>
<b>Otro Nombre</b>
<b>Origen Lingüístico:</b> español, quichua, cañari, español-quichua, español-cañari, quichua-español, quichua-cañari, cañari-español, cañari-quichua.
<b>Motivación Temática:</b>
<b>Epotopónimos</b> (nombres de lugares que designan un espacio generalmente habitado)
<b>Morfotopónimos</b> (hace referencia a todo tipo de relieve)
<b>Hidrotopónimos</b> (relacionados con el agua).
<b>Fitotopónimos</b> (concernientes a la flora).
<b>Zootopónimos</b> (alusivos a la fauna).
<b>Cromotopónimos</b> (referentes a la cualidad de los topónimos: forma, color, tamaño, numéricos y otras).
<b>Hagiotopónimos</b> (alusivos a la vida religiosa y a los nombres de santos y advocaciones piadosas).

Por la diversidad de los nombres atribuidos a los distintos sitios de la parroquia Sayausí y con el fin de facilitar su identificación con respecto a su naturaleza, cualidad y motivación temática, a la mayoría de topónimos se les ha asignado dos nombres así: Todo lo relacionado con agua: ríos, lagunas, quebradas, se nombra primero con el nombre Hidrotopónimo, entonces la laguna Illincocha, sería un Hidrotopónimo - fitotopónimo, la quebrada Patacocha, Hidrotopónimo - Morfotopónimo.

Todas las localidades y lugares poblados llevan primero el nombre de Epotopónimos, así por ejemplo la localidad Picotacucho es un Epotopónimo-Cromotopónimo. La localidad San Vicente, Epotopónimo - Hagiotopónimo.

Los que nombran a las formas fisiográficas, van precedidas de Morfotopónimo, loma Cucheros es un Morfotopónimo-Cromotopónimo. Filo Ávila Huayco, Morfotopónimo-Antropotopónimo .

Aquellos que hacen alusión a la conectividad van precedidos del nombre Conectotopónimos por ejemplo Puente Turupamba, Conectotopónimo-Cromotopónimo, Ingañan, Conectotopónimo -Hagiotopónimo.

Cuando se trata de un elemento puntual, lleva un solo nombre como La Ermita que es un Hagiotopónimo.

De conformidad a este criterio es como se elaboró la clasificación para motivación temática tanto del nombre actual como del nombre anterior si lo tuviere el topónimo analizado.

DISEÑO DE UN SIG PARA LA GESTIÓN DE TOPÓNIMOS

*Cartografía Base*

- Mapa de delimitación geográfica de la parroquia Sayausí, Fuente: I. Municipalidad de Cuenca. (Ordenanza Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca de diciembre de 2011).
- Mapa de localidades de la parroquia Sayausí. (Fuente: I. Municipalidad de Cuenca. Arq. Fernando Landívar - CARTOSIG. Ltda. “Diseño e Implementación del Modelo Técnico y Avalúo Catastral Rústico del Cantón Cuenca, 2006).
- Imagen Satelital de la ciudad de Cuenca, 2013 (Fuente: I. Municipalidad de Cuenca).

La depuración y edición de la cartografía base está orientada a la obtención de datos confiables que permitan la ejecución de las diferentes etapas para la conformación del SIG de topónimos. Es así que los mapas, sus respectivas tablas y la imagen satelital fueron analizados con el fin de verificar la calidad y cobertura física de la información necesaria para la parroquia Sayausí. Debe señalarse que la Imagen Satelital no cubre toda la parroquia, falta una pequeña área al nor-oeste que limita con San Antonio, parroquia del cantón Cañar (Figura 1).

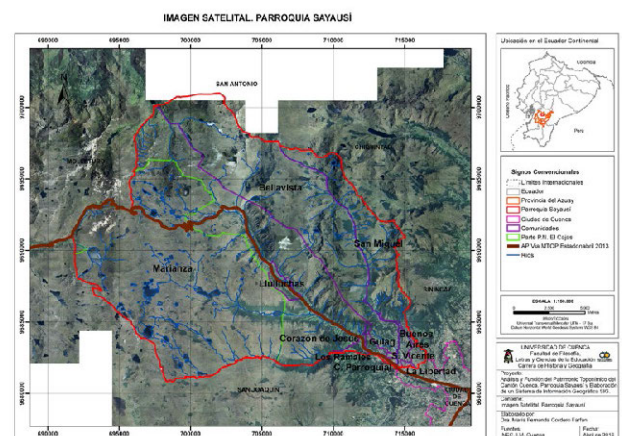



Figura. 1. Cartografía Base e Imagen Satelitaria. Área Sayausí

*Trabajo en Campo*

El trabajo realizado en campo se lo realizó en dos momentos: El primero, referido a la localización geográfica de los sitios mediante el uso del Sistema de Posicionamiento Global (GPS). El segundo, basado en entrevistas que fueron consignadas en fichas y que contienen información no sólo para la elaboración del nomenclátor, sino también para trabajos relacionados con la historia, la antropología y la lingüística entre otros.

Esta información es factible de ser consultada en el SIG, a través de la herramienta HYPERLINK que permite enlazar la ficha de topónimo con el punto geográfico (coordenada X e Y) y su correspondiente en la tabla de atributos.

#### FICHA I

"Análisis y Función del Patrimonio Toponímico del Cantón Cuenca: Parroquia Sayausí y Elaboración de un Sistema de Información Geográfico. SIG"		Motivación Temática	
FICHA DE REGISTRO		Nom Actual: idrotopónimo-Cromotopónimo Nom Anterior: Fitotopónimo	
<b>1. DATOS DE LOCALIZACIÓN</b>			
Provincia: Azuay			
Cantón: Cuenca			
Parroquia: Sayausí			
Comunidad: Buenos Aires			
Sistema Geodésico Mundial 1984. (WGS84) Z17S		Altitud	
Coordenadas Planas UTM: X (Este) 714599 Y (Norte) 9684992		2917 m.s.n.m	
Coordenadas Geográficas Latitud 2 50 54.0 S Longitud 79 04 10.0 W			
Coordenada tomada en un tramo de la quebrada		Proyecto Ordenanza N° 5	
<b>2. FOTOGRAFIA REFERENCIAL</b>			
			
Descripción de la fotografía: Quebrada Calicanto.			
<b>3. DATOS DE IDENTIFICACIÓN</b>			
Denominación Actual: Calicanto		Antigua Dudahuaco	
Origen: Español		Quichua- planta semejante al carrizo, del género de las arundinarias	
Tipo: Quebrada			
<b>4. DESCRIPCIÓN</b>			
Quebrada Calicanto. Nombre español Quebrada con calicantos muros de cal y canto rodado. Es el nombre de una quebrada de la parroquia Sayausí, este apelativo es nuevo, moradores del sector desconocen el porque del nombre, Manuel Guerrero menciona "Se llama Dudahuaco no Calicanto, se debe a que existía una planta parecida al carrizo."			
<b>5. INTERLOCUTORES</b>			
Nombre y Apellidos	Dirección	Sexo	Edad
Manuel Guerrero	Trancahuaco	M	72
<b>6. ELEMENTOS RELACIONADOS</b>			
Textos	Fotografías	Audios	Videos
<b>7. ANEXO FOTOGRAFICO</b>			
Registrado por: María Fernanda Cordero Farfán			
Fecha de Registro: Enero 2016			

#### Procedimientos para el registro de la información

Con GPS, se tomaron 129 puntos que corresponde a barrios, ríos, quebradas, lagunas y elevaciones; en lo referente a ríos y quebradas, fue tomado en un lugar no específico del tramo, en las lagunas en sus orillas, idéntico procedimiento se siguió para registrar barrios y asentamientos.

No ocurrió así con los puntos registrados sobre la base del mapa de localidades del Catastro Rural que suman 175, donde se generaron centroides (media geométrica de un polígono), método utilizado en este trabajo para el registro de coordenadas de cada una de las referidas localidades. Con la finalidad de conservar y ordenar la información de las referidas localidades, se procedió a elaborar también las fichas respectivas.

En aquellas áreas donde fue imposible llegar, se procedió a georeferenciar desde la imagen satelital, 69 puntos. De esta manera se cubrió prácticamente toda la parroquia Sayausí, con un total de 373 georeferencias que representan los topónimos de la parroquia (Figura 2).

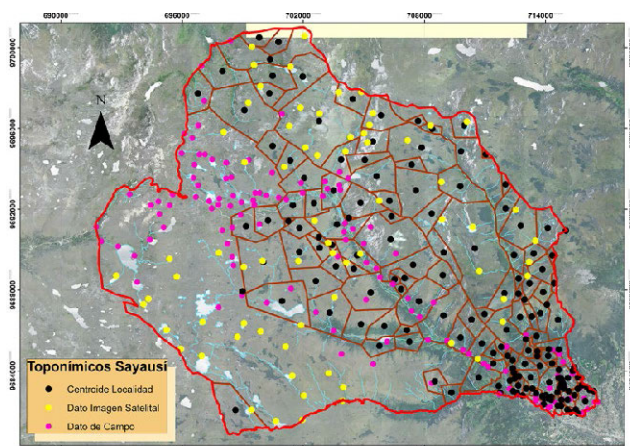


Figura 2. Toponímicos Sayausí

### III RESULTADOS

#### NOMENCLÁTOR GEOGRÁFICO DE LA PARROQUIA SAYAUSÍ.

Como se hizo referencia en el acápite correspondiente, el nomenclátor contiene 373 topónimos o identificadores geográficos, clasificados por su origen lingüístico y temática.

#### Estructura de la Tabla de Atributos del Nomenclátor

Se procedió a llenar la información en la tabla de atributos del shapefile, conforme a la estructura elaborada para el Nomenclátor. La tabla queda conformada con los campos que se detallan a continuación, cada uno de ellos o su combinación pueden ser sujetos a consultas o servir para la generación de nuevos mapas o reportes:

1. Fid. Constituye la primera columna que se muestra automáticamente. Indica el número de registro para cada clase de entidad. Es el valor que refiere el número secuencial de la tabla de contenido del archivo shapefile.
2. Shapefile. Formato de almacenamiento de datos vectoriales de ESRI. Es el archivo que almacena la ubicación, la forma y los atributos de las entidades geográficas, se representan por medio de puntos, líneas o polígonos (áreas). En este caso es un punto.
3. X, representa el este y el oeste, es la longitud en metros, sistema de coordenadas proyectadas. Universal Transverse Mercator (UTM) y Datum geodésico WGS84 que significa Sistema Geodésico Mundial 1984.
4. Y, representa el norte y el sur, es la latitud en metros. Sistema de coordenadas proyectadas. Universal Transverse Mercator (UTM) y Datum geodésico WGS84 que significa Sistema Geodésico Mundial 1984.
5. Latitud, (paralelo) es el ángulo que existe entre un punto cualquiera y el ecuador, medida sobre el meridiano que pasa por dicho punto (grados, minutos y segundos)
6. Longitud, (meridiano) mide el ángulo a lo largo del ecuador desde cualquier punto de la Tierra. Se acepta que Greenwich en Londres es la longitud 0. (grados, minutos y segundos)
7. Altitud, medida en metros sobre el nivel del mar (msnm). El nivel del mar sirve como referencia para ubicar la altitud de las localidades y accidentes geográficos.
8. Procedencia, (origen de la coordenada: 1. generación de centroide en cada una de las comunidades del Catastro Rural, 2. proveniente de un punto tomado en la imagen satelital y 3. punto tomado en campo mediante el uso de GPS)
9. Nombre De La Parroquia. "Sayausí"

**TABLA III**  
ESTRUCTURA DE LA TABLA ARCGIS 9.3

10. Código De La Parroquia: tomado del INEC. Es el identificador que enlaza a otras bases de datos
11. Nombre Actual del topónimo
12. Origen del nombre actual
13. Significado del nombre actual
14. Temática del nombre actual
15. Nombre anterior
16. Origen del nombre anterior
17. Significado del nombre anterior
18. Temática del Nombre anterior
19. Otro Nombre (un tercer nombre)
20. Historia.
21. Ordenanza (registro de 32 entidades que han cambiado su nombre primigenio y que conforman la propuesta de un proyecto de Ordenanza,
22. Enlace con la ficha de topónimo (Hyperlink)

Es así que la tabla de atributos del SIG de Topónimos de la Parroquia Sayausi queda conformada por 20 campos, más 2 que se crean automáticamente en el sistema (Fid y Shape), es decir 22 columnas en total.

El enlace con otras tablas u otras bases de datos, para el uso, análisis y gestión de información proveniente de fuentes diversas se lo haría a través del campo "Código de la Parroquia", notación utilizada a nivel de nuestro país, generada por el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos del Ecuador (INEC).

**CONSULTAS Y GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN.**

La Tabla de Atributos constituye la base de datos del Nomenclátor de Topónimos de la Parroquia Sayausi, cuyo objetivo dentro de un SIG -entre otros- es el de consultar, analizar, comparar, seleccionar y crear nueva información las veces y momento que se creyere conveniente.

Todas las columnas del nomenclátor y por tanto de la tabla de atributos del SIG, están sujetas a consulta y análisis, ya sea

de forma individual o combinada, lo que permite obtener una gran cantidad de información alfanumérica y de mapas.

Dentro de los SIG y específicamente de ArcGIS, el SQL (Structured Query Language), se comporta como un lenguaje relativamente sencillo, tiene pocas instrucciones y funcionan con bastante lógica.

La mayor parte de las sentencias de selección por atributos y por localización o los cálculos de los campos (columnas) utilizan este lenguaje: así mismo, constituye el centro de una buena cantidad de operaciones porque a través de sentencias responde a lo que el investigador quiere que suceda.

A más de lo referido, ArcGis dispone de una serie de herramientas y comandos que facilitan las consultas e investigación como las que proporciona el módulo ArcToolbox que posibilita gestionar y ejecutar las herramientas de geoprociamiento.

Las posibilidades de gestionar la información son muy amplias, así por ejemplo la referida a Motivación Temática (del nombre actual y anterior del topónimo) permite realizar cerca de 2.000 preguntas, algo parecido sucede con la de Origen del Nombre del Topónimo (actual y anterior), más de 150 consultas. Si a lo anotado le adicionamos los datos consignados en los campos "Altitud", "Procedencia", "Significado del Nombre Actual", del "Anterior", "Otro Nombre", "Historia" y "Proyecto de Ordenanza", se ve que se incrementa notablemente la capacidad de análisis, gestión y generación de nueva información.

Como ejemplos a continuación se muestra el resultado de algunas consultas realizadas en el ArcGis 9.3

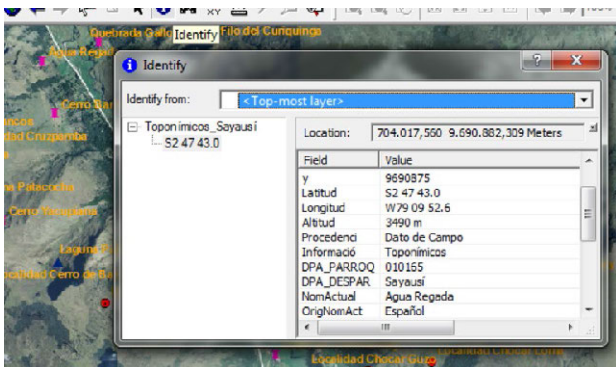


Figura.3. Información vinculada a la Tabla de Atributos del SIG

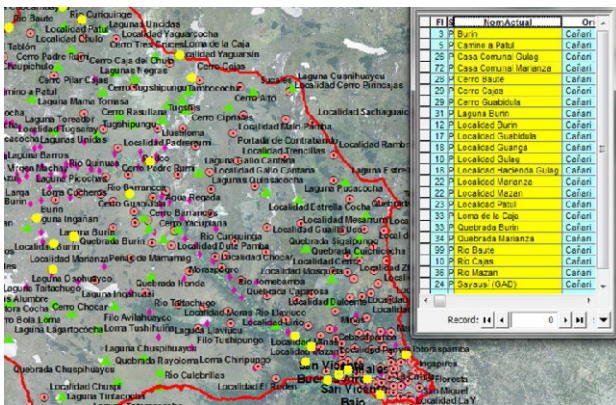


Figura.4. Topónimos de origen español-quichua: el resultado indica 60 de 373 topónimos

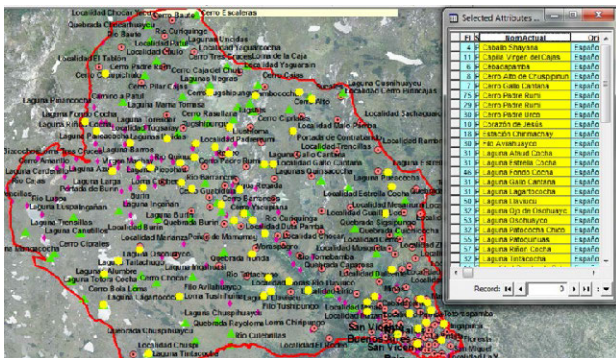


Figura.5. Topónimos de origen cañari-quichua y de estos ¿los morfotopónimo-cromotopónimo? Resultado uno

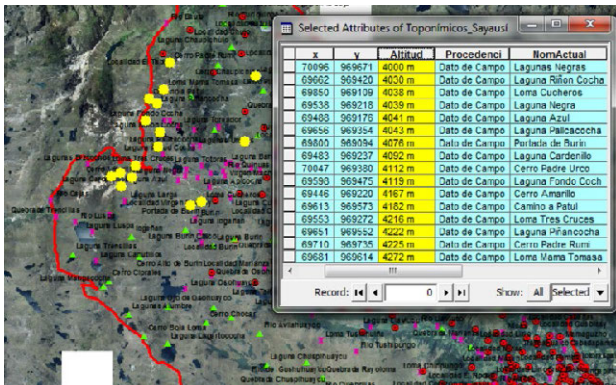


Figura.6. Topónimos cuya altura es igual o superior a los 4000 m.s.n.m. y de éstos, únicamente los que fueron tomados en campo con GPS. El resultado en la imagen que sigue

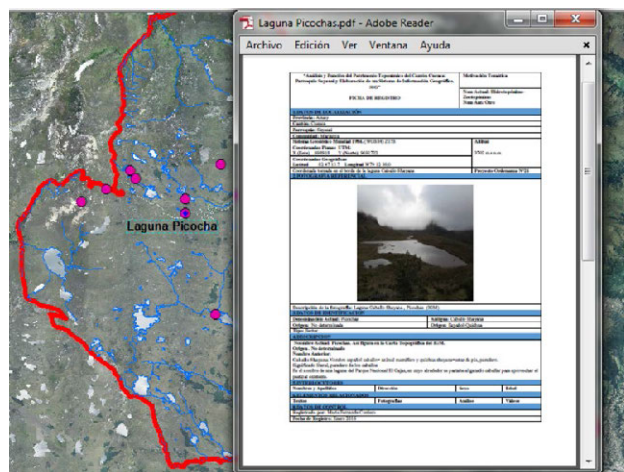


Figura 7. Topónimos con la información contenida en cada una de las fichas A través de la herramienta Hyperlink

Es posible visualizar y consultar información referente a los 373 topónimos de la parroquia Sayausí, al utilizar la versión gratuita de Google Earth, aplicación que permite, sobre la base de la fotografía satelital, incluir los datos y cartografía del proyecto. Para ello se utilizó la herramienta Map To KML del módulo ArcToolbox, de la plataforma de ArcGIS 9.3.

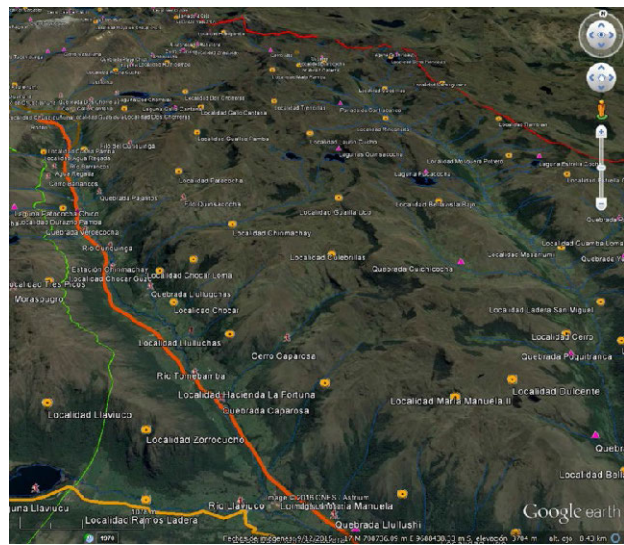


Figura 8. Topónimos en Google Earth

## TERRITORIO Y TOPÓNIMOS.

“Sayausi significa donde usan polleras, porque las personas han sabido utilizar una pollera llamada saya y ellos mismos la hacían con la lana del borrego, a base de hilados, antes se decía ¡ponte la saya! ¡usa la saya!” (Quishpe, 2016)

### Relaciones entre Territorio y nombres de Lugar o Topónimos.

Es interesante el tema de la relación entre territorio y los nombres de lugar; relación que, en la mayoría de los casos, describe peculiaridades geográficas o expresan situaciones de orden socio-cultural como: las formas topográficas e hidrográficas; modelado, color de las aguas o la forma que adquieren sus cursos.

Otros sitios reciben el nombre de la flora que lo caracteriza o de los animales de la fauna actual o extinguida.

Las condiciones climáticas, la semejanza a personas y animales, las referidas al color, olor, sabor no dejan de estar pre-



sentos, como también nombres de lugares que son escenario de actos divinos extra-naturales y que generalmente son asociados a historias, leyendas en varios casos interpretadas por la gente que vive a sus alrededores y que, en no pocos casos, son portadoras de un conocimiento que va transmitiéndose de generación en generación.

Todo esto se pretende rescatar con la información contenida en las fichas de topónimos que seguramente, ayudará a investigadores interesados en las áreas de la Geografía, Historia, Antropología, Arqueología entre otras.

Los topónimos fueron, son y serán elemento esencial en Cartografía, tanto por la función que tienen como identificadores geográficos referenciados, cuanto por la información que proporcionan como herramienta discursiva e informativa del territorio con enorme contenido semántico y simbólico tal como se muestra en los ejemplos escogidos al azar que pueden referirse a plantas, animales o cualquier otro elemento que se detallan a continuación y que son parte de las fichas de topónimos que pueden ser consultadas, analizadas o gestionadas, sobre la base del nomenclátor que forma la estructura del Sistema de Información Geográfico (SIG) elaborado.

#### *Topónimos que dan cuenta sobre animales hoy desaparecidos.*

- Cerro Alto de Burin. (Morfortopónimo-Zootopónimo).

Del español alto=de gran tamaño y cañari Burin = una especie de felino salvaje del páramo, semejante a un gato a un tigrillo

“... antiguamente hubo en este sector un predominio de los animales conocidos como purimises (pl.de purimise) o burines (sing de burin), una especie animal propia de las alturas, parecido a un gato doméstico, de color negro-grisáceo (romano), como un tigrillo; es un mamífero que acude a las casas en busca de gallinas, preferentemente, para su subsistencia. Actualmente estos animales han desaparecido de las alturas y tan solo, en forma eventual, se los encuentra en las partes bajas u orillas” (Espinoza y Jácome, 1988).

Esta información interesa para explicar las características de un animal prácticamente extinguido, conocido en la época Cañari, de allí su nombre.

- Laguna Oso Huaycu. (Hidrotopónimo-Zootopónimo)

Nombre español y quichua huaycu=quebrada Significado literal, quebrada del oso.

Moradores del lugar refieren que de vez en cuando aparecen osos y que por la noche cerca de la laguna se solía escuchar como gruñían. César Jarama dice “existían osos, anteriormente si habían”.

#### *Topónimos que hablan sobre prácticas hoy desaparecidas.*

- Cerro Alto de Chuspipuña (Morfortopónimo-Cromotopónimo)

Nombre español alto=gran altura y quichua chuspi=persona de ojos pequeños y puñuna= descansar, pernoctar.

Miguel Quishpe cuenta que se llama Chuspipuña, porque “ha habido chuspis, es decir los que duermen”. En este sector han sabido dormir los arrieros que iban hacia Molleturo o que venían a Cuenca.

Arrieros, personas que en tiempos pasados se ganaban el pan transportando mercaderías o trago de contrabando y necesariamente tenían que pernoctar en esa zona,

#### *Topónimos que describen las propiedades de los lugares*

- Laguna Apicocha (Hidrotopónimo-Cromotopónimo)

Nombre quichua api=mazamorra y cucha = laguna. Significado literal, laguna de la mazamorra

El apelativo se debe a la calidad fangosa de sus aguas. Se observó en el trabajo de campo la presencia de mucho lodo, lo que ha provocado la formación de una especie de islotes en medio de la laguna.

- Chirimachay (Epotopónimo-Cromotopónimo)

Nombre quichua chiri=frio y machay=cueva. Significado literal, cueva del frio.

César Jarama menciona “se llama así por el frío del Lugar”

- Localidad Cachi Quingray (Epotopónimo-Cromotopónimo)

Nombre quichua cachi=sal y quingray=ladera

Significado literal, ladera de la sal

#### *Topónimos que explican prácticas ligadas a una actividad económica*

- Laguna Caballo Shayana (Hidrotopónimo-Zootopónimo)

Nombre español caballo= animal mamífero y quichua shayana=estar de pie, paradero. Significado literal, paradero de los caballos

Laguna, en cuyos alrededores pastaba al ganado caballar

- Cebadapamba (Fitotopónimo)

Nombre español y quichua pampa=llanura. Significado literal, Llano de la cebada.

Es el nombre de un sector de la comunidad de Buenos Aires, poseedor de tierras aptas para el cultivo de la cebada, gramínea cultivada desde muchos años atrás hasta la actualidad, como se pudo observar durante el trabajo de campo.

#### *Topónimos que describen la vegetación existente*

- Laurín Cucho (Epotopónimo-Fitopónimo)

Nombre cañari, variante de Aurín y Auri (auri es una fruta silvestre comestible, parecida al gullán) y quichua cucho=rincón. Significado literal, rincón del laurín.

- Laguna Illincocha (Hidrotopónimo-Fitotopónimo)

Nombre Quichua Illin=una variedad de grama y cucha=laguna Significado literal, lugar con Illín.

César Jarama cuenta “allí ha sido el primer campamento del ex CREA, para la construcción de la carretera Cuenca - Molleturo Naranjal. Donde había un monte llamado Illin.

- Laguna Totorascocha ( Hidrotopónimo-Fitotopónimo)

Nombre quichua tutura=planta acuática Scirpus totora y cucha=laguna Significado literal, laguna de las totoras

Su nombre es debido a la abundante presencia de la planta conocida como totora, especie acuática que crece de manera silvestre en lugares pantanosos

#### *Topónimos asociados a mitos, leyendas, divinidades*

- Río Curiquinge (Hidrotopónimo-Zootopónimo)

Nombre quichua que designa al ave de rapiña. Falcobaenus carunculatus des murs. El nombre es compuesto de curi=o-

ro y quinquí=cuerno Significado literal, cuerno de oro. Ave sagrada de los Incas.

César Jarama dice “son tipo gavilán pero no dañinos, porque no comen pollos como los gavilanes, este animal vive de las lombrices, de bichos, son de la misma especie pero no son tan dañinos como el gavilán.”

- Laguna Llaviucu (Hidrotopónimo-Cromotopónimo)

Nombre español llave y quichua ucu= hueco, Significado literal, hueco de la llave

Denominación Antigua Huahuamag = niño pequeño.

Pablo Buestán cuenta “en la laguna de Llaviucu hubo una viga de oro de 60x60 de extremo a extremo; dicen que la laguna no tiene fondo, que embravecía y salía. Para que se amanse tuvieron que bendecirle y hacer una misa, dicen que una vez botaron cabos, querían sacar esa viga pero no pudieron.

María Maclovía Roldán relata: “mis abuelitos contaban que en Llaviucu de verazmente ha habido las vigas de oro. Las Vigas de oro en Llaviucu en la Mamamag y la Huahuamag decía que la una está arriba y la otra es casi igualita. Mi abuelito había visto que brilla porque de allá han sabido traer la madera para hacer la iglesia de Sayausí, decían que debían andar con cuidado porque eran bravísimas, que es de tener miedo. A las doce del día y a las doce de la noche estaban brillando las lagunas, clarito se aparecía la viga.”

#### *Topónimos que describen la morfología (tipología)*

- Quebrada Dos Chorreras (Hidrotopónimo-Cromotopónimo)

Nombre español. Significado literal, lugar de dos choros

Quebrada que se origina de laguna homónima: Debido a la forma irregular del terreno el agua cae formando dos chorros.

- Cerro Escaleras. (Morfotopónimo)

Nombre español. Significa elevación con escalones

Topónimos cuyo origen se presume Cañari, con significado desconocido

- Localidad Guanga (Epotopónimo-Otros)

En la obra el Quechua y el Cañari de Octavio Cordero Palacios figura Guanga = apellido.

- Localidad Mazán (Epotopónimo-Otros)

Nombre probablemente cañari de significado desconocido

- Localidad de Patul (Epotopónimo-Otros)

Nombre probablemente cañari de significado desconocido

#### *Topónimos que hacen alusión a conectividad*

- Quebrada Chacayacu (Hidrotopónimo-Conectopónimo)

Del Quichua chaca=puede y yacu=agua. Significado literal, puente de agua

- Ingañan (Conectotopónimo-Hagiotopónimo)

Quichua inca=soberano y ñan=camino. Significado literal, camino del Soberano

## IV. CONCLUSIONES

- Que, la toponimia es a la vez patrimonio intangible y patrimonio geográfico al ser interpretado, utilizado y en cierta forma modelado por la acción sucesiva y temporal de los grupos humanos. En Sayausí, los nombres de lugar como patrimonio intangible y geográfico son el resultado del transitar por el tiempo de las culturas: cañari, inca y española, con el mestizaje que ello implica.
- Que, la información creada, su posibilidad de análisis y gestión, apoya a nuevas investigaciones y proporciona datos confiables que contribuyen al mejor conocimiento de la toponimia y de los topónimos de la parroquia rural de Sayausí.
- Que, la información generada durante el trabajo de investigación, contribuye a emprender una tarea indispensable en el país, la “Normalización de Nombres Geográficos”; que no es más que la aprobación, por parte de la autoridad competente de cada país de los nombres propios de las entidades geográficas, de la forma exacta de escribirlos y de las condiciones para su uso. IGN España. (2014). Así mismo, se entiende que un topónimo normalizado responde a normas y criterios establecidos por esa misma autoridad y se convierte en Oficial cuando ha seguido un proceso administrativo para ser publicado por la entidad en referencia.
- Que, la ficha de topónimo, como fuente de información primaria y secundaria que sustenta la estructura del Nomenclátor de Topónimos de la parroquia Sayausí, reviste características singulares, al permitir su consulta, ingresando al SIG elaborado para el efecto. Las fichas contienen información de utilidad para trabajos relacionados con la historia, la sociología, la antropología, la lingüística, entre otros.
- Que la recolección de datos en campo, aporta una nueva información que proviene de la observación directa o de las entrevistas mantenidas con moradores del lugar; misma que debe ser validada o refutada sobre la base de una posterior información recibida.
- Que, con el diseño y puesta en marcha del Nomenclátor y del SIG de Topónimos de la Parroquia Sayausí, se contribuye a la recuperación y conservación de los nombres de lugares, en tanto su registro está georeferenciado. Esto implica obtener la exacta localización geográfica y proceder con las consultas que se consideren oportunas. Del mismo modo, sirven de referencia para la elaboración de otros estudios que abarca la amplia temática de la toponimia. Contribuye también a la planificación, por ser un instrumento para la localización y consulta sobre lugares que forman parte de la ordenación de los territorios.
- Que las 373 georeferenciaciones, corresponden a sitios de interés histórico, geográfico y socio-cultural de la parroquia, región y país. Todos estos cuentan con una ficha que detalla la información recogida durante el trabajo de campo, vinculada al Sistema de Información Geográfica. SIG; lo cual facilita la consulta y constituye a la vez material interesante para otras investigaciones, al contar con narraciones e historias de muchos lugares en su relación con el territorio.

## AGRADECIMIENTOS

La Ponencia presentada es parte de un trabajo de investigación, que titula “Análisis y Función Del Patrimonio Toponímico del Cantón Cuenca: Parroquia Sayausí y Elaboración de un Sistema De Información Geográfico, SIG”, que lo realizó la autora durante el año sabático, 2015-2016- concedido por la Universidad de Cuenca, Ecuador. Es para esta Institución Educativa el agradecimiento por haberme formado y por el apoyo que brinda a sus profesores para involucrarse en proyectos de investigación de diversa índole.

## REFERENCIAS

- ALCÁZAR, Adela , A., & AZCÁRATE, M. (2009). Normas de Toponimia del Instituto Geográfico Nacional (España). Madrid, España: Instituto Geográfico Nacional (España).
- Buestán, Pablo. Toponímicos Parroquia Sayausí, (2016)
- CELDRÁN, P. (2006). Diccionario de Topónimos Eespañoles y sus Gentilicios (3° ed.). Madrid: Espasa Calpe.
- CORDERO , M. F. (2010). Teoría y Prácticas de ArcGis 9.3. (F. d. Universidad de Cuenca, Ed.) Cuenca, Ecuador.
- CORDERO PALACIOS, O. (1982). Diccionario Quichua Cañari. Cuenca Ecuador: Banco Central del Ecuador.
- CORDERO PALACIOS, O. (1982). Estudios Históricos (Vol. Colección Histórica N° 9). Cuenca Ecuador: Banco Central del Ecuador.
- CORDERO, L. (1967). Diccionario Quichua-Español Español-Quichua. Cuenca, Ecuador: Talleres Universidad de Cuenca.
- COROMINES, J. (1965 y 1970). Estudis de toponímia catalana . Barcelona, España: Barcino.
- DARBY, H. (1957). Place names and geography. The Geographical Journal.
- DÍAZ ALAYÓN, C. (2013). La Toponimia de Canarias Aportes Lingüísticos. Recuperado el 28 de enero de 2016, de <https://www.google.com/search?q=++D%C3%8DAZ+ALAY%C3%93+N%2C+Carmen+La+toponimia+de+Canarias+aportes+ling%C3%BC%C3%ADsticos&ie=utf-8&oe=utf-8>
- ENCALADA, O. (1990). Toponimias Azuayas (Primera ed.). Quito: Banco Central del Ecuador.
- ENCALADA, O. (2002). Diccionario de Toponimia Ecuatoriana (Vols. I,II,III,IV). Cuenca: CIDAP- Universidad del Azuay.
- ESPINOSA, J., & JÁCOME, G. (1988). Las Toponimias del Cajas Y Girón. Cuenca, Azuay, Ecuador: Casa de la Cultura Ecuatoriana, Núcleo del Azuay.
- GARCÍA, J. (2007). Atlas Toponímico de España, Arco Libros
- Guerrero, Manuel. Toponímicos Parroquia Sayausí, (2016)
- I.MUNICIPALIDAD DE CUENCA. (2012). Plan de Ordenamiento Territorial (PDOT) Sayausí. Cuenca.
- IGM (Ecuador). (2009). Propuestas para la Creación de la Junta Nacional de Topónimos. Quito, Ecuador. Recuperado el 6 de enero de 2016, de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>
- INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL. (2014). Toponimia: Normas para el MTN25. Conceptos Básicos y Terminología Publicación Técnica núm. 42. Madrid-España: IGN España.
- Jarama, César. Toponímicos Sayausí, (2016)
- MENESES, J., & CARDENAS, J. (2011). Diseño e Implementación de un Sistema de Información Geográfico (SIG) Sobre Software Libre para la Secretaría de Planeación del Municipio de Guadalajara de Buga. Cali, Colombia. Recuperado el 28 de abril de 2016, de <http://bibliotecadigital.univalle.edu.co/bitstream/10893/3223/1/CB-0449644.pdf>
- MOREU-REY, E. (1995). Tipología toponímica. En V. M. ROSSELLÓ, *Materials de Toponímia* . Valencia, España : Univer-sitat de València.
- PAZ Y MIÑO, L. (1936). Contribución al Estudio de las Lenguas Indígenas del Ecuador (Vol. XIV (39/31)). Quito: Boletín de la Academia Nacional de Historia.
- POIRIER, J. (2003). Toponimia y Marginalidad. Recuperado el 17 de abril de 2015, de <http://www.ub.edu/geocrit/sn/sn-138.htm>
- Quishpe, Miguel. Toponímicos Parroquia Sayausí, (2016)
- REAL ACADENIA DE LA LENGUA. (2001). Diccionario de la Lengua Española. (22nd ed.) Madrid: Espasa Calpe S.A.
- RODRIGUEZ, A. V. (20112). Toponimia y Nomenclátore. Fundamentos de la IDE. España: UPM-Press.
- RODRIGUEZ, A., & VÁZQUEZ, A. (2013). Nuevas tendencias en el análisis y el tratamiento de la toponimia en el marco de las Infraestructuras de Datos Espaciales. Recuperado el 2 de marzo de 2016, de [http://idee.es/resources/presentaciones/JIIDE13/jueves/30\\_Nuevas\\_tendencias\\_Toponim](http://idee.es/resources/presentaciones/JIIDE13/jueves/30_Nuevas_tendencias_Toponim)
- RODRIGUEZ, F. (2002.). Hacia una teoría de la Ciencia Toponímica . España: Revista Española de Lingüística. Recupe-rado el 13 de octubre de 2015, de [http://digital.csic.es/bitstream/10261/32241/1/Ciencia\\_toponimica.pdf](http://digital.csic.es/bitstream/10261/32241/1/Ciencia_toponimica.pdf)
- Roldán, María. Toponímicos Parroquia Sayausí. (2016)
- RUANO, M. (2007). Estandarización de la Geoinformación en el Ecuador . (I. D. GEOGRÁFICA, Ed.) Quito, Ecuador. Re-cuperado el 11 de marzo de 2015, de <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/>
- SENPLADES. (2013). Catálogo Nacional de Objetos Geográficos Versión 2.0. (SENPLADES, Ed.) Quito, Ecuador. Recupe-rado el 14 de diciembre de 2015, de <http://www.planificacion.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2014/04/Catálogo-Nacional-de-objetos-geogr%C3%A1ficos.pdf>





# Gestión y ordenamiento territorial



# Análisis espacial y evaluación de zonas de potenciales conflictos ambientales, productivos y patrimoniales ante la expansión urbana en la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina). Aplicación: La expansión urbana en Luján y los potenciales conflictos entre usos del suelo

Buzai Gustavo<sup>1,2</sup>, Lanzelotti Sonia<sup>1,2</sup>, Humacata Luis<sup>1</sup>, Principi Noelia<sup>1</sup>, Acuña Suárez Gabriel<sup>1</sup>, Baxendale Claudia<sup>1</sup>

1 Instituto de Investigaciones Geográficas (INIGEO)/Universidad Nacional de Luján  
Ruta Nacional N° 5 y Av. Constitución/ (6700) Luján/ Argentina

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
prodisig@unlu.edu.ar / www.prodisig.unlu.edu.ar

## RESUMEN

El impacto de la urbanización sobre el uso del suelo rural es una temática de gran relevancia actual, principalmente cuando se analizan las regiones en la cuales este proceso influye en la actividad productiva primaria y en las condiciones naturales que brindan importantes servicios ambientales. En Argentina, la ecorregión Pampa Ondulada es una de las principales zonas agroproductivas del mundo. En ella existe un notable crecimiento urbano a través del Gran Buenos Aires y ciudades de tamaño intermedio. Este trabajo presenta aspectos centrales del proyecto de investigación: objetivos generales, objetivos específicos, análisis de la relevancia del problema y diseño de la investigación. Asimismo se presentan resultados a través de la expansión de las áreas urbanas del municipio de Luján y los potenciales conflictos entre usos del suelo. La totalidad de resultados se presentan como herramienta de planificación hacia el ordenamiento territorial del área de estudio.

Palabras clave: **Expansión urbana, usos del suelo, modelado espacial, análisis espacial, cuenca del río Luján.**

## ABSTRACT

*The impact of urbanization in rural land-use is a subject of great current importance, mainly when analyzing the regions in which this process influences in primary productive activity and natural conditions that provide important environmental services. In Argentina, the Rolling Pampa Ecoregion is one of the main agro-productive zones of the world. In it there is a great urban growth through Greater Buenos Aires and medium-size cities. This paper presents central aspects of the research project: general objectives, specific objectives, analysis of the relevance of the problem and research design. Results are also presented through the expansion of the urban areas in the municipality of Luján and the potential conflicts between land uses. All the results are presented as a tool for land use planning in the study area.*

**Keywords: Urban sprawl, Land-use, Spatial Modelling, Spatial Analysis, Luján River Basin.**

## I. INTRODUCCIÓN

La Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT) es un organismo dependiente del Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva cuya función es apoyar proyectos de investigación para la generación de nuevos conocimientos científicos y tecnológicos. Cuenta con cuatro líneas de trabajo<sup>1</sup> entre las cuales el Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT), es el encargado directo de apoyar proyectos en temáticas teóricas y aplicadas desarrollados por investigadores pertenecientes a instituciones públicas y privadas sin fines de lucro radicadas en el país. Su visión es precisamente ser un instrumento efectivo para la excelencia científica y el desarrollo tecnológico.

En este marco, el FONCYT realiza anualmente concursos abiertos a la presentación de proyectos denominados PICT (Proyectos de Investigación Científica y Tecnológica) que cuentan con un estricto sistema de evaluación.

En esta presentación se incluyen aspectos teóricos y un caso aplicativo del proyecto titulado “Análisis espacial y evaluación de zonas de potenciales conflictos ambientales, productivos y patrimoniales ante la expansión urbana en la cuenca del río Luján (provincia de Buenos Aires, Argentina)”, que se desarrolla en el Instituto de Investigaciones Geográficas (INIGEO) de la Universidad Nacional de Luján, y que fuera aprobado por el FONCYT en su convocatoria 2014-2015. La investigación se basará en la utilización del análisis espacial con SIG para la determinación de potenciales conflictos entre diferentes usos del suelo en los partidos pertenecientes a la Cuenca del Río Luján (Figura 1), y temáticas relevantes para diferentes áreas de la cuenca. El proyecto tiene como plazo de ejecución los años 2015 a 2018.

## II. OBJETIVOS GENERALES

Los objetivos generales surgen a partir de problemáticas desencadenadas por la dinámica de expansión urbana sobre la cuenca del río Luján. Será analizado el impacto de la evolución espacial de la aglomeración sobre ambientes rurales y de conservación para los partidos de la cuenca<sup>2</sup>, sobre sitios de interés patrimonial (arqueológicos, paleontológicos e históricos) para la cuenca alta<sup>3</sup> y sobre la actividad agrícola tradicional para el eje de crecimiento noroeste<sup>4</sup> de la aglomeración del Gran Buenos Aires.

En todos los casos se determinarán las zonas de potencial conflicto ante la evolución espacial en la distribución espacial de los usos del suelo. El conflicto Urbano/Rural/Conservación ambiental para toda la cuenca. El conflicto Urbano/Patrimonial para la cuenca alta. El conflicto Urbano/Productividad agrícola tradicional para el sector de crecimiento oeste de la aglomeración Gran Buenos Aires.

### OBJETIVO GENERAL A NIVEL CUENCA

Determinar y analizar la distribución espacial de las áreas de potencial conflicto entre usos del suelo en los partidos correspondientes a la cuenca del río Luján con centralidad en los usos urbano, agrícola y de conservación ambiental.

### OBJETIVO GENERAL DE FOCALIZACIÓN PATRIMONIAL

Determinar y analizar la expansión urbana de las últimas dos décadas en los partidos de la cuenca alta del río Luján y evaluar el riesgo que representa para los sitios paleontológicos y arqueológicos (históricos y prehispánicos) de interés patrimonial y los fenómenos de identidad asociados.

### OBJETIVO GENERAL DE FOCALIZACIÓN PRODUCTIVA PRIMARIA

Determinar y analizar la expansión urbana de las últimas dos décadas en los partidos del sector de crecimiento oeste de la aglomeración Gran Buenos Aires a fin de evaluar su impacto sobre la productividad tradicional en la región.

Cada objetivo apunta a una problemática diferente de manera prospectiva para la próxima década:

1. Conflicto socioespacial que genera la expansión urbana sobre la productividad rural y zonas de conservación ambiental en la cuenca.
2. Conflicto socioespacial que genera la expansión urbana sobre la productividad tradicional, con focalización en el eje de expansión oeste del Gran Buenos Aires.



Mapa 1. Cuenca del río Luján  
Fuente: Lanzelotti y Buzai (2015)

## III. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS A NIVEL DE LA CUENCA

- Realización de la base de datos geográfica en formato raster con múltiples capas temáticas (Capas temáticas: área de estudio, urbano, rutas, ferrocarriles, hidrografía, vegetación, entre otros).
- Creación de mapas de aptitud para la expansión urbana.
- Creación de mapas de aptitud para la producción agrícola.
- Creación de mapas de aptitud para la conservación.
- Creación de mapas de conflictos combinados (urbano-agrícolas, urbano-conservación, agrícola-conservación, urbano-agrícola-conservación).

### OBJETIVOS ESPECÍFICOS EN LA CUENCA ALTA

- Relevamiento de información acerca de la ubicación de los

1 Fondo para la Investigación Científica y Tecnológica (FONCYT), Fondo Tecnológico Argentino (FONTAR), Fondo Fiduciario de Promoción de la Industria del Software (FONSOFT) y el Fondo Argentino Sectorial (FONARSEC)

2 Campana, Carmen de Areco, Chacabuco, Escobar, Exaltación de la Cruz, General Rodríguez, José C. Paz, Luján, Malvinas Argentinas, Mercedes, Moreno, Pilar, San Andrés de Giles, San Fernando, Suipacha y Tigre.

3 Carmen de Areco, Chacabuco, Mercedes, San Andrés de Giles y Suipacha.

4 General Rodríguez, Luján, Mercedes, Moreno y San Andrés de Giles.



sitios de interés patrimonial (arqueológicos, paleontológicos e históricos)

- Creación de bases cartográficas con la ubicación de estos sitios de interés patrimonial.
- Evaluación del estado de conservación de estos sitios
- Realización de excavaciones y sondeos en lugares que resulten de interés patrimonial y/o identitario.
- Creación de mapas de conflictos entre el crecimiento de la aglomeración y sitios de interés patrimonial.

#### OBJETIVOS ESPECÍFICOS EN EL SECTOR DE CRECIMIENTO OESTE DE LA AGLOMERACIÓN GRAN BUENOS AIRES

- Ampliación de la base de datos geográfica en formato raster con información específica para este nivel de análisis (variables socio-demográficas, actividades productivas primarias, aptitud del suelo, uso del suelo, nuevas urbanizaciones, entre otras)
- Creación de mapas de aptitud para la expansión urbana.
- Creación del mapa social.
- Creación de mapas de actividades económicas.
- Creación de mapas de conflictos combinados (urbano-actividades económicas primarias)

#### **IV. RELEVANCIA DEL PROBLEMA**

La temática general tiene su sustento en el fenómeno de dispersión urbana (urban sprawl), una tendencia de larga data en Argentina. Las oleadas migratorias desde finales del siglo XIX, el proceso de industrialización a mediados del siglo XX y las políticas neoliberales de la década de 1970 y 1990 consolidaron esa tendencia. La última etapa permitió ampliar los límites de la expansión de manera notable, principalmente por actuar en el campo de accesibilidad general a través de la creación de autopistas urbanas.

La importancia del tema está dada por el impacto que genera el cambio en los usos del suelo a través de la expansión urbana en espacios naturales, en sitios de valor patrimonial y en sitios de producción rural tradicional. Aparecen conflictos de competencia entre usos del suelo y ello afecta notablemente a las actividades desarrolladas por las poblaciones locales.

Los procedimientos empleados en esta investigación permitirán generar mapas de potenciales conflictos en una visión prospectiva que definirá una herramienta de utilidad para avanzar en propuestas de actuación en materia de ordenamiento territorial transferibles a las instancias de gestión.

Desde un punto de vista temático podemos señalar los trabajos de Borsdorf (2003), Bruegmann (2005), Tsai (2005), Arellano y Roca (2010), Arribas-Bell et al. (2011), los cuales se centran en el urban sprawl detallando sus efectos socioespaciales. Desde la Geografía Aplicada, el Análisis Espacial constituye una serie de técnicas estadísticas y matemáticas aplicadas al estudio de los datos distribuidos sobre el espacio geográfico (Buzai y Baxendale, 2011).

En diferentes momentos de la evolución científica el Análisis Espacial ha contado con dos líneas de definición. Una propuesta por O'Sullivan y Unwin (2003); que consideran su

amplitud a partir de definirlo en base a cuatro contextos: (1) tratamiento de datos espaciales, (2) análisis de datos espaciales de forma descriptiva y exploratoria, (3) aplicación de estadística espacial, y (4) modelado espacial en la búsqueda de diferentes escenarios; y otra propuesta por Berry (1996), que considera que el Análisis Espacial se define a través de operaciones cuyos resultados dependen de la localización espacial.

Existen trabajos de Análisis Espacial con SIG en diferentes áreas, un ejemplo es el trabajo realizado por Baxendale (2010), "Crecimiento urbano y pérdida de suelos productivos en la ciudad de Rosario (1931-2000), donde fue analizado mediante procedimientos del modelado cartográfico. Este estudio se realizó con la finalidad de analizar el crecimiento urbano de la ciudad de Rosario y la pérdida de suelos productivos, se compatibilizaron diferentes fuentes cartográficas como capas temáticas para la base de datos en SIG. Las posibilidades de combinación de capas temáticas para la obtención de resultados numéricos y nuevos mapas se basó en superposiciones por imposición. Otro antecedente es el trabajo realizado por Buzai y Baxendale (2011) "Determinación de zonas de potencial conflicto entre usos del suelo en el partido de Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina"<sup>5</sup>, donde se presentan diferentes mapas de aptitudes (urbana, agrícola, conservación), a partir de la implementación de evaluación multicriterio y método LUCIS (Land Use Conflict Identification Strategy), lo que permite determinar las zonas que son factibles de tener potenciales conflictos entre usos del suelo.

Un antecedente de importancia inicial lo constituyó el "Atlas Digital de la Cuenca del Río Luján. Sociodemográfico, económico y habitacional" desarrollado en el Laboratorio de Cartografía Digital del Departamento de Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Luján (Buzai, 2002), ya que brinda información de base fundamental para el desarrollo de este proyecto. A partir de los antecedentes mencionados se cuenta con la información básica para generar las capas temáticas a ser utilizadas posteriormente en la aplicación del modelado cartográfico y del método LUCIS. Conocer y analizar las zonas que presentarían conflictos a futuro permite brindar propuestas de solución y generar estrategias para el ordenamiento territorial. La investigación permite hacer confluir dos líneas de investigación desarrolladas por el Grupo de Estudios sobre Análisis Espacial y Sistemas de Información Geográfica (GESIG) del Programa de Investigación y Docencia en Sistemas de Información Geográfica (PRODISIG). Con la finalidad de poder implementar el trabajo de investigación propuesto es necesario confeccionar una base de datos para Sistemas de Información Geográfica (SIG) de estructura raster. Con una focalización hacia la expansión urbana se detallarán problemáticas ambientales, patrimoniales y productivas de relevancia regional/local, en tanto detección de conflictos producidos por el cambio de uso del suelo.

Respecto del enfoque patrimonial cabe destacar que la cuenca del río Luján ha sido objeto de análisis y debate a escala internacional desde el siglo XIX, de la mano de las propuestas de Florentino Ameghino (Ameghino, 1880-81; Lanzelotti y Acuña, 2014)<sup>6</sup> y continuaron a lo largo de todo el siglo XX y lo que va del siglo XXI (Acuña Suarez et al., 2013; Viloría et al.,

<sup>5</sup> Trabajo realizado en el marco del proyecto de investigación Análisis espacial con Sistemas de Información Geográfica: Avances teórico-metodológicos para la identificación de zonas de potencial conflicto ante la evolución espacial de usos del suelo. Aplicación en diferentes escalas espaciales, radicado en el Departamento de Ciencias Sociales de la Universidad Nacional de Luján mediante Disposición CDD-CS N° 840/09.

<sup>6</sup> Si bien sus teorías acerca del origen americano de la humanidad fueron refutadas, lo cierto es que los estudios de Ameghino permitieron plantear y probar -por primera vez en la historia- la coexistencia del hombre con aquella misma megafauna extinguida, lo cual hoy en día (y tras numerosas investigaciones posteriores) es un tema aceptado con naturalidad por la comunidad científica.

2011). Lamentablemente muchos de los nuevos hallazgos arqueológicos y paleontológicos suceden con motivo del avance de la urbanización, cuyas urgencias se contraponen -aparentemente- con la protección del patrimonio. Cabe destacar que desde el año 2003 rige la Ley Nacional 25743 de "Proyección del Patrimonio Arqueológico y Paleontológico" que prevé la protección de los mismos.

La focalización estará dada en el sistema humano, en el espacio absoluto y en el espacio relativo, contemplando características correspondientes a las localizaciones, distribuciones espaciales, asociaciones espaciales, interacciones espaciales y evoluciones espaciales abordadas a través de técnicas del análisis espacial cuantitativo apoyadas en SIG. En este sistema, el componente demográfico-poblacional aporta el estudio de las manifestaciones espaciales de aspectos poblacionales y sus diversas características y el componente económico-productivo cuestiones concernientes a la producción, el consumo y usos del suelo.

## V. DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

La ciencia como proceso puede ser considerado el rasgo más característico de lo que se denomina proceso de investigación científica. Representa una transformación que forma parte de una evolución secuencial entre dos acontecimientos centrales: el surgimiento de un problema y las acciones que se realizan para encontrarle una solución (Samaja, 2004). En este sentido, el conocimiento en formación lleva al cumplimiento de determinados procedimientos tendientes a la producción de conocimientos científicos que, en el caso de la Geografía Aplicada, resulten, a su vez, de utilidad para la resolución de problemáticas de índole espacial.

A continuación se presenta la secuencia llevada a cabo por la investigación en diferentes fases de desarrollo, desde la teoría hasta la transferencia de resultados.

### FASE 1: CONCEPTUAL

A desarrollarse durante todo el proceso de investigación, con preponderancia durante el primer año de acuerdo al cronograma de trabajo.

En esta fase se consideran supuestos ideológicos, sistemas de valores, creencias, aspiraciones e intereses desde donde se realiza el estudio, al tiempo que se reflexiona sobre la pertinencia del tema o problemática planteada y su encuadre dentro del pensamiento científico. El proyecto tiene contemplado avanzar en las tres focalizaciones espaciales a través de tomar la teoría de los sistemas complejos (García, 2010).

El marco epistémico guía las acciones del proyecto desde el inicio, ya que la problemática a estudiar surgió desde esta instancia. La base empírica es el recorte espacial regional de la cuenca del río Luján y los atributos que serán tenidos en cuenta sistematizados en la base de datos geográfica en SIG. Las prácticas geográficas para tratar unidades espaciales y atributos se basan en el análisis espacial cuantitativo, a partir de la aplicación metodológica se llega a la Geografía Aplicada con resultados que tienen utilidad para apoyar el ordenamiento territorial prospectivo del área de estudio.

### FASE 2: CONCEPTUAL-METODOLÓGICA

A desarrollarse durante el segundo semestre del proyecto de acuerdo al cronograma de trabajo.

En esta fase se hace operativa la formulación aplicativa del proyecto. De esta manera, la problemática planteada se ajusta

con la finalidad de poder encuadrarse en el interior del pensamiento científico y surge el interrogante correspondiente a su correcto planteamiento ante la necesidad de su confrontación metodológica con la base empírica.

Comienza con la conformación exhaustiva del estado de la cuestión a partir de fuentes bibliográficas obtenidas desde diferentes medios. Esta búsqueda llevará a realizar ajustes en el marco teórico de la investigación, principalmente respecto de los conceptos de base. Esta sistematización permite demarcar definitivamente la investigación, demostrando aquellos aspectos que no fueron tratados o el avance sobre diferentes temas, en definitiva, permite determinar los alcances teóricos y metodológicos de la investigación.

Se delimita el espacio geográfico (área de estudio), se determina el tiempo (años o período), se redefinen los objetivos (realizando ajustes en función de la disponibilidad de recursos humanos y económicos) y se determinan los métodos que serán empleados. La profundidad que tendrá la investigación se encuentra relacionada con el carácter de las hipótesis a ser formuladas.

Aunque las Hipótesis sean consideradas las guías de una investigación al constituir las afirmaciones que en su papel de respuestas conjeturales a las preguntas planteadas y pueden ser comprobadas o no, pero deben estar en estrecha relación con los objetivos de la investigación. Todas las hipótesis planeadas en esta investigación cuentan con el hilo conductor del crecimiento urbano sobre diferentes ambientes naturales y humanos.

### FASE 3: METODOLÓGICA-TECNOLÓGICA

A desarrollarse desde el segundo al quinto semestre del proyecto de acuerdo al cronograma de trabajo.

Contiene los componentes que permiten concretar lo diseñado a partir de la definición de tareas y técnicas que hacen operativas las metodologías. En esta instancias deben ser definidos los elementos a utilizar para medir y poder corroborar/refutar objetivamente los enunciados presentados como hipótesis.

El procesamiento de los datos geográficos está relacionado con el trabajo concreto que se hará con los datos obtenidos y sistematizados. En SIG corresponde al uso del subsistema de tratamiento, el cual como toolbox (caja de herramientas) dispone de una serie de operaciones estandarizadas que permiten obtener diferentes resultados.

Es durante esta etapa que serán aplicados los siguientes procedimientos de análisis espacial:

#### *Análisis de evaluación multicriterio*

Existen diferentes procedimientos que pueden ser aplicados a esta estructura de datos espaciales, principalmente incluidas en lo que se ha denominado modelado cartográfico, especialidad con mayor aptitud para las estructuras de tipo raster (DeMers, 2002) y que define las reglas de aplicación para la obtención de resultados mediante procedimientos de superposición cartográfica.

El mayor avance en el modelado cartográfico lo constituyen las denominadas técnicas de evaluación multicriterio, las cuales amplían las posibilidades de trabajo hacia la obtención de resultados como configuraciones espaciales de posibilidades a futuro, que están altamente vinculados a los procedimientos subjetivos necesarios en el funcionamiento de las metodologías objetivas.

El análisis de evaluación multicriterio comienza con una información básica, como se ha dicho, compuesta por variables en formato cartográfico que sirven como criterios para realizar

los procedimientos de evaluación. Hay dos tipos de criterios; aquellos que presentan valores continuos de aptitud locacional en cada variable, llamados factores, y las capas temáticas que actúan con la finalidad de confinar los resultados en un sector delimitado del área de estudio, llamados restricciones.

Mediante la selección de variables, sus tratamientos tendientes hacia la generación de factores y restricciones, y la determinación de diferentes formas de combinación nos encaminamos hacia la búsqueda de resultados. Las formas de vinculación se denominan reglas de decisión y su proceso de aplicación evaluación.

*LUCIS: Land-use conflict identification strategy (LUCIS)*

Tomando como base la lógica de las técnicas de modelado cartográfico (Tomlin, 1990), las de evaluación multicriterio apoyadas por el uso de Sistemas de Información Geográfica, Carr y Zwick (2006, 2007) han propuesto un modelo de resolución estandarizada de interesantes capacidades para la identificación empírica de áreas potenciales de conflicto entre usos del suelo.

El modelo propuesto por estos autores ha sido denominado LUCIS y contempla la realización de diferentes pasos como camino de resolución hacia la obtención del mapa con las áreas de conflicto.

Los pasos para la aplicación del modelo son los siguientes: (1) Definición de objetivos, (2) Creación de la base de datos espacial, (3) Análisis de aptitud, (4) Determinación de preferencias, (5) Aplicación de la regla de decisión y reclasificación de resultados y (6) Identificación de áreas potenciales de conflicto

El resultado corresponde a la obtención de tres mapas de conflictos para cada uno de los objetivos considerados y un mapa final con la totalidad de doce combinaciones en categorías de usos del suelo con potencialidad de conflicto.

A partir de la aplicación de estos procedimientos se llega a la obtención de resultados en forma numérica, gráfica o cartográfica, siendo esta última el resultado privilegiado de la Geografía Aplicada, y de los SIG. Son resultados que corresponden básicamente a la distribución espacial de las relaciones y problemáticas analizadas.

Al disponer de los resultados es posible pasar a la siguiente fase del proceso de investigación, en la cual se hará la validación operativa y empírica.

#### FASE 4: VALIDACIÓN

En esta etapa se avanza en el análisis e interpretación de los resultados a partir del marco teórico base de la investigación. En el caso de la Geografía Aplicada estos resultados corresponderán a relaciones espaciales de los factores sociales. De acuerdo a la teoría de los sistemas complejos aplicada al ámbito de la investigación en Geografía (Buzai y Cacace, 2013) desde la focalización espacial que brindan las posturas racionalista y cuantitativa es posible también abordar estos resultados en múltiples escalas (infra y supra-focal) a partir de considerar la aptitud de diferentes paradigmas de la Geografía.

Con la finalización del análisis se realiza la Validación de Hipótesis cuando se confrontan los resultados con las hipótesis formuladas (contrastación) es posible determinar si los enunciados planteados se corroboran o se refutan. Verificar la veracidad o falsedad de hipótesis es uno de los logros de la investigación y, de esta manera, llegar a una verdad que es provisoria.

A partir de los aspectos obtenidos en los dos componentes previos se llega al Modelo Explicativo de la Realidad, instan-

cia definida a partir del trabajo de García (2000). Mediante un proceso de sucesivas representaciones se busca llegar a un modelo que pueda explicar satisfactoriamente la base empírica de la cual partió y con la cual fue construido el sistema como totalidad organizada, no solamente con la intención de describirlo, sino que se explicará la estructura y evolución de los principales procesos que dan cuenta de su función.

Lograr la reconstrucción de la evolución de los principales procesos que determinan el funcionamiento del sistema es lo que permite predecir y plantear evoluciones a futuro. Corresponde considerar que la Geografía no es solamente una ciencia del presente como lo establecen las posturas clásicas, sino que también es una ciencia prospectiva de acuerdo a la tradición sistémica. En base a estas posibilidades se prevé obtener gran parte de los resultados, configuraciones espaciales de conflictos, como visión prospectiva para la realización de propuestas de ordenamiento territorial.

#### FASE 5: TRANSFERENCIA

Mediante la elaboración de diferentes resultados se llega a la fase de transferencia, que básicamente la consideraremos dirigida a dos ámbitos: Hacia la investigación y docencia y hacia la planificación y gestión. La primera corresponde a una transferencia directa en las asignaturas de grado-posgrado y a los proyectos de investigación en curso desarrollados por los miembros del grupo en el nivel universitario. La segunda como elementos de base hacia los organismos de gestión territorial brindando una herramienta para la toma de decisiones.

Organismos que presentan interés en los resultados obtenidos, tanto por participar de relaciones académicas como vinculados a través de convenios institucionales con la Universidad Nacional de Luján: Comité de Cuenca del río Luján, Municipalidad de Luján, Municipalidad de Mercedes, Municipalidad de San Andrés de Giles y Red Unidesarrollo.

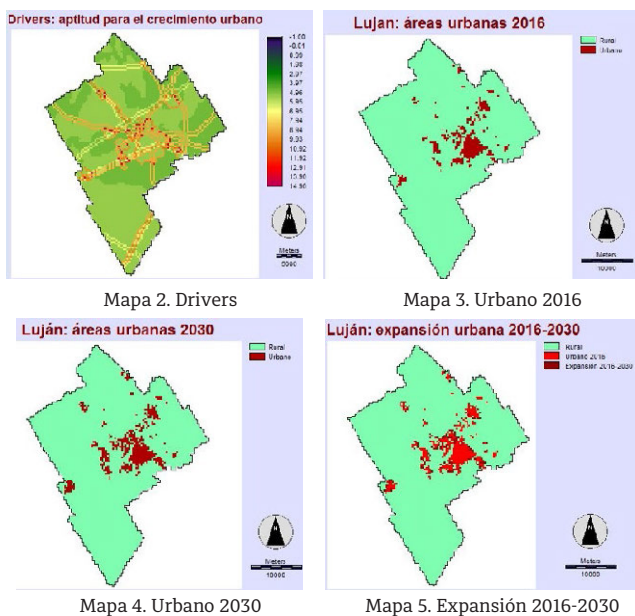
La transferencia incluye divulgación de los resultados a través de presentaciones y publicaciones, tanto de material escrito como de bases de datos. Se contempla la realización del Atlas de Geografía Humana de la cuenca del río Luján con la finalidad difundir la totalidad de trabajos realizados en el marco del proyecto.

#### **VI. EJEMPLO DE APLICACIÓN: EXPANSIÓN DE LAS ÁREAS URBANAS DE LUJÁN Y POTENCIALES CONFLICTOS ENTRE USOS DEL SUELO**

Los aspectos totales de la aplicación pueden consultarse en Buzai (2017), artículo en el cual se presenta la relación entre el modelado de crecimiento urbano y su superposición (asociación espacial) con diferentes características espaciales de aptitud.

En este punto, sintéticamente mencionaremos que el modelado de crecimiento urbano se ha realizado con un mapa de direccionamiento formado por la combinación de cuatro características y una matriz de contigüidad de 3x3. Los resultados obtenidos contemplan un crecimiento intercensal anual de población del 1,66% al extrapolar el valor de crecimiento porcentual anual de todo el período, en gran parte coinciden con el carácter cíclico evidenciado desde 1970.

Los resultados cartográficos se presentan a continuación, hacia la definición de un área urbana que hacia 2030 crece un 27,92%. A continuación se presentan los mapas de direccionamiento (Mapa 2), áreas urbanas 2016 (Mapa 3), áreas urbanas 2030 (Mapa 4) y áreas de expansión urbana 2016-2030 (Mapa 5).



La Tabla I presenta la tabulación cruzada entre los mapas extremos, las categorías del área urbana de 2016 en las columnas y las del 2030 en las filas. Se evidencia la superficie en hectáreas que cambian de estado rural a urbano.

**TABLA I**  
TABULACIÓN CRUZADA ENTRE URBANO\_2016 (COLUMNAS) Y URBANO\_2030 (FILAS). VALORES EN HECTÁREAS.

AÑOS	CLASES	2030			TOTAL
		EXTERIOR	RURAL	URBANO	
2016	EXTERIOR	160283	0	0	160283
	RURAL	0	71982	0	71982
	URBANA	0	1250	4481	5731
	TOTAL	160283	73232	4481	237996

Se destaca el aumento de 1250 hectáreas del área urbana cuando se lee la categoría Urbano en el sentido de las filas y la misma disminución del área rural a partir de la categoría Rural en el sentido de las columnas.

La imagen de evolución futura, en la línea del análisis exploratorio de datos espaciales, puede considerarse un tema central para la planificación territorial (Aguilera Benavente et al. 2011) ya que permitirá realizar evaluaciones correspondientes al impacto ambiental, disminuir la incertidumbre en la toma de decisiones y generar estrategias como propuestas para el manejo de los impactos.

#### CRECIMIENTO URBANO Y POTENCIALES CONFLICTOS A NIVEL REGIONAL

La asociación espacial entre la expansión urbana 2016-2030 y la distribución espacial para el desarrollo de diferentes usos del suelo se resuelve a través de procedimientos de superposición temática en los cuales el resultado presenta los niveles de aptitud en las localizaciones que corresponden a la expansión.

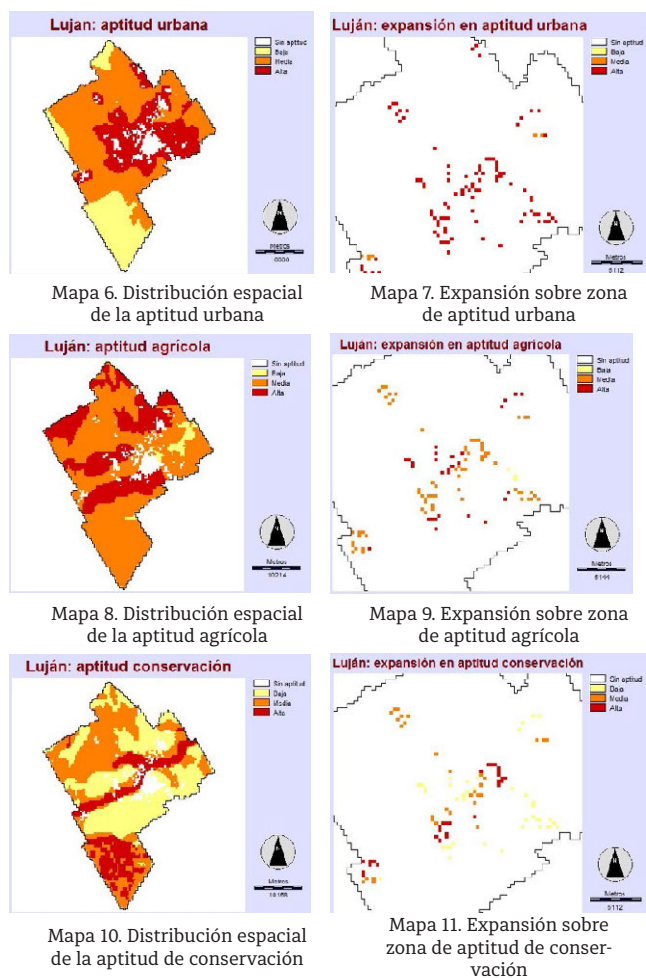
Los mapas 6, 8 y 10 presentan los resultados correspondientes a la distribución espacial de las aptitudes para la actividad urbana, agrícola y para la conservación ambiental en distribuciones espaciales que abarcan la totalidad del municipio.

Los procedimientos metodológicos para la realización de mapas de aptitud fueron aplicados a nivel partido para Luján (Buzai y Baxendale, 2007, 2008) y a nivel cuenca (Buzai y Prin-

cipi, 2017). La metodología propuesta por Carr y Zwick (2006, 2007) demostró su gran utilidad.

Los mapas 7, 9 y 11 presentan los resultados de superposición de estas áreas de expansión a las áreas de aptitud y se representan mediante una ampliación de la zona que permite verla con mayor detalle.

Los resultados del método de evaluación multicriterio por combinación lineal ponderada presentan características diferenciales en los mapas de aptitud para los valores máximos que son aquellos tenidos en cuenta para los siguientes cálculos de potenciales conflictos.



A partir de los resultados cartográficos es posible calcular los datos numéricos de los valores superficiales en hectáreas para el total de relaciones (superposiciones temáticas entre el área de crecimiento urbano y las zonas de aptitud urbana, agrícola y de conservación) y contar con las distribuciones espaciales resultantes. La siguiente tabla presenta los resultados obtenidos.

**TABLA II**  
EXPANSIÓN URBANA SOBRE LAS ÁREAS DE APTITUD

APTITUD	CATEGORÍA	EXPANSIÓN URBANA 2016-2030 (HA)	EXPANSIÓN URBANA 2016-2030 (HA%)
Aptitud Urbana	Alta	1177	94
	Media	73	6
	Baja	0	0
	Total	1250	100

Aptitud Agrícola	Alta	340	27
	Media	874	70
	Baja	36	3
	Total	1250	100
Aptitud de conservación	Alta	352	28
	Media	413	33
	Baja	485	39
	Total	1250	100

De acuerdo a los resultados del modelado exploratorio de cambio de usos del suelo las localizaciones urbanas aumentarán en 1250 hectáreas entre 2016 y 2030. A partir del modelado cartográfico se verifica una asociación espacial del 94% del crecimiento de la aglomeración sobre las zonas de aptitud urbana alta y el 6% restante sobre las zonas de aptitud urbana media. De esta manera se puede validar la aptitud del modelo de crecimiento (perspectiva horizontal) con características combinadas que favorecerían el cambio (perspectiva vertical).

El mapa 12 se forma con las distribuciones espaciales del área urbana en 2016 (Categoría 1), la expansión al 2030 sin conflicto (Categoría 2), en áreas de conflicto agrícola (Categoría 3) y en áreas de conflicto de conservación (Categoría 4).



Mapa 12. Distribución espacial de la aptitud de conservación

Mapa 13. Expansión sobre zona de aptitud de conservación

TABLA III  
SUPERFICIE DEL ÁREA DE EXPANSIÓN Y POTENCIALES CONFLICTOS

CATEGORÍA	SUPERFICIE (HA)	% EXPANSIÓN (HA)	% EXPANSIÓN (HA) SIN/CON CONFLICTO
Urbano 2016	4481	—	—
Expansión s/conflicto	559	44,72	44,72
Conflicto urbano/agrícola	340	27,20	55,28
Conflicto urbano/conservación	351	28,08	
Total (Superficie 2030)	5731	100	100

La asociación espacial entre las localizaciones de crecimiento urbano y la aptitud agrícola indica que 340 hectáreas están sobre zonas de aptitud alta y 874 hectáreas sobre aptitud media. La asociación espacial con la aptitud para la conservación indica que 351 hectáreas están sobre zonas de aptitud alta y 413 hectáreas sobre aptitud media.

Como se verifica que las localizaciones de aptitud alta agrícola y de conservación no tienen correspondencia espacial

(mapa 13) se puede afirmar que el potencial conflicto entre usos del suelo se producirá en 691 hectáreas, un 55,28% del crecimiento urbano.

El mapa 13 (contexto municipal) y el mapa 14 (ampliación de zonas urbanas) presentan los clusters principales de potencial conflictividad de la expansión urbana con la producción agrícola y las áreas de conservación respectivamente. A partir de aquí se cuenta con la distribución espacial y la superficie sobre las cuales se deberían activar mecanismos si se quisiera evitar esta expansión, por ejemplo incentivos económicos a la actividad agrícola que permitan equiparar los cambiantes valores del suelo o leyes restrictivas de protección ambiental con la finalidad de mantener los servicios ambientales actuales.

Desde el punto de vista de la Geografía Aplicada podemos afirmar que la aplicación de modelos de cambio de usos del suelo junto a las técnicas de valuación multicriterio se presentan como muy útiles líneas de aplicación de la tecnología SIG como herramienta de planificación territorial, combinando cuestiones cuantitativas y decisiones cualitativas, particularmente en la posibilidad de realizar diagnósticos que apoyen el logro de soluciones.

## VII. CONCLUSIONES

El presente trabajo incluye las características principales del proyecto y un caso de aplicación como aporte del análisis espacial cuantitativo para el estudio del impacto regional de la expansión urbana. El avance del proyecto permitirá conocer la estructura espacial presente y lograr modelizaciones prospectivas de la dinámica territorial.

Aquí se ha presentado un inicial resultado correspondiente al estudio de la evolución espacial del área urbana del Partido de Luján en 2016 modelizando su expansión hacia el 2030 con la consiguiente obtención de resultados cartográficos y alfanuméricos para su análisis e interpretación de los potenciales conflictos entre usos del suelo.

El estudio de las manifestaciones espaciales brinda la posibilidad de ver y explorar una configuración empírica en la consideración del territorio como sistema complejo compuesto por diferentes niveles de análisis. La focalización espacial es propia de la Geografía como ciencia.

Los SIG en aplicaciones modelísticas de análisis espacial presentan resultados valiosos para el estudio de las configuraciones espaciales y con ello, apoyar acciones académicas en diferentes líneas.

Los resultados del proyecto constituyen una base empírica de análisis que se transforma en una herramienta para la toma de decisiones para el ordenamiento territorial, permitiendo detectar tendencias evolutivas hacia situaciones no deseadas con posibilidad de ser resueltas mediante acciones político-administrativas con sustento científico-tecnológico.

## REFERENCIAS

- Acuña Suárez, G.E.; Lanzelotti, S.L; Coronel, G. & Arzani, H. (2013). Arqueología y Paleontología de la cuenca superior y media del río Luján. Estado Actual y Perspectivas. I Congreso de Ambiente y Sociedad de la cuenta del río Luján. Programa de actividades. Luján, 30 de noviembre de 2013.
- Aguilera Benavente, F.; Valenzuela Montes, L.M.; Gómez Delgado, M. & Plata Rocha, W. (2011) Escenarios y modelos de simulación como instrumentos en la planificación territorial metropolitana. Serie Geográfica 17, 11-28.
- Ameghino, F. (1880-81). La Antigüedad del Hombre en el Plata. París-Buenos Aires: Masson-Igon.

- Arellano, B. & Roca, J. (2010). El Urban Sprawl, ¿Un Fenómeno de Alcance Planetario? Los Ejemplos de México y España. *Arquitectura, Ciudad y Entorno* 4(12), 115-147.
- Arribas-Bel, D.; Nijkamp, N. & Scholten, H. (2011). Multidimensional urban sprawl in Europe: A self-organizing map approach. *Computers, Environment and Urban Systems* 35, 263-275
- Baxendale, C. (2010). El crecimiento de la aglomeración de Rosario (1931-2000) y su relación con unidades cartográficas de suelos, capacidades de uso e índices de productividad. En: Buzai, G. (Ed) *Geografía y Sistemas de Información Geográfica. Aspectos conceptuales y aplicaciones*. Luján, GESIG, pp. 395-420.
- Baxendale, C. & Buzai, G.D. (2011). Dinámica de Crecimiento urbano y pérdida de suelos productivos en el Gran Buenos Aires (Argentina), 1869-2011. *Análisis espacial basado en Sistemas de Información Geográfica. Serie Geográfica*, pp. 77-95.
- Berry, J.K. (1996). The Unique Character of Spatial Analysis. *GIS World*. April: 29-30.
- Borsdorf, A. (2003). *Cómo modelar el desarrollo y la dinámica de la ciudad latinoamericana*. Eure, 29(86), 37-49.
- Bruegmann, R. (2005). *Sprawl. A Compact History*. Chicago: The University of Chicago Press.
- Buzai, G.D. (Dir) (2002). *Atlas Digital de la cuenca del río Luján*. Universidad Nacional de Luján. Luján (versión CD).
- Buzai, G.D. (2017) Crecimiento urbano y potenciales conflictos entre usos del suelo en el municipio de Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Modelado espacial 2016-2030. Cuadernos Geográficos*. (en prensa).
- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A. (2007) Áreas de potencial conflicto entre usos del suelo. Identificación mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (Primera parte: descripción metodológica). *Fronteras*, 6(6), 45-59.
- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A. (2007) Áreas de potencial conflicto entre usos del suelo. Identificación mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (Segunda parte: aplicación). *Fronteras*, 7(7), 33-39.
- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A. (2011). Determinación de zonas de potencial conflicto entre usos del suelo en el Partido de Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina. En: Buzai, G.D.; Morina, O.J. (Comp.) *I Jornadas de Investigación del Programa de Estudios Geográficos. Serie PROEG 12*. UNLu. 69 páginas + CD.
- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A. (2011). *Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Tomo 1: Perspectiva científica / Temáticas de base raster*. Buenos Aires: Lugar Editorial.
- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A. (2012). *Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Tomo 2: Ordenamiento territorial / Temáticas de base vectorial*. Buenos Aires: Lugar Editorial.
- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A. (2010). Determinación de zonas de potenciales conflictos entre usos del suelo en el Partido de Luján, Buenos Aires, Argentina. En: Buzai, G.D.; Baxendale, C.A.; Cacace, G.; Dzendoletas, M.A. (2011) *Análisis de usos del suelo urbano y regional. Localizaciones óptimas y conflictivas estudiadas con Sistemas de Información Geográfica*. Luján: UNLu. Proeg-11, pp. 175-183.
- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A. (1998). Buenos Aires (1869-1991). La geometría urbana como representación de una historia económica y sociodemográfica. *Signos Universitarios*, 18(34), 71-88.
- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A.; Cacace, G.; Dzendoletas, M.A. (2010). *Análisis de usos del suelo urbano y regional. Localizaciones óptimas y conflictivas estudiadas con Sistemas de Información Geográfica*. En: Buzai, G.D.; Baxendale, C.A.; Cacace, G. & Dzendoletas, M.A. *Análisis de usos del suelo urbano y regional. Localizaciones óptimas y conflictivas estudiadas con Sistemas de Información Geográfica*. Proeg-11. Universidad Nacional de Luján. Luján.
- Buzai, G.D. & Cacace, G. (2013). El concepto de espacio. *Si Muove* 5, 34-38.
- Buzai, G.D. & Principi, N. (2017) Identificación de áreas de potencial conflicto en la cuenca del río Luján (Argentina). *Revista Geográfica de América Central*. (en prensa).
- Carr, M.H. & Zwick, P.D. (2006). Using GIS suitability analysis to identify potential future land use conflicts in north central Florida. *Journal of Conservation Planning*, 1(1), 89-105.
- Carr, M.H. & Zwick, P.D. (2007). *Smart Land Use Analysis: The LUCIS Model*. Redlands: ESRI Press.
- DeMers, M. (2002). *GIS Modeling in raster*. Chichester: John Wiley.
- García, R (2000) *Sistemas Complejos*. Gedisa. Barcelona.
- Dzendoletas, M.A. (2010). Determinación de zonas de potencial conflicto de usos del suelo en la ciudad de Bariloche, Provincia de Río Negro, Argentina. En: Buzai, G.D.; Baxendale, C.A.; Cacace, G. & Dzendoletas, M.A. *Análisis de usos del suelo urbano y regional. Localizaciones óptimas y conflictivas estudiadas con Sistemas de Información Geográfica*. Luján: UNLu. Proeg-11, 184-203.
- Lanzelotti, S.L. & Acuña Suarez, G.E. 2014. *Florentino Ameghino en Mercedes. Homenaje en el centenario de su fallecimiento*. Mercedes: MCA Libros.
- Lanzelotti, S. & Buzai, G.D. (2015). Cuenca del río Luján. Su delimitación. Informe técnico del Proyecto PICT-2014-1388. N° 1. GESIG-PRODISIG. Luján.
- Matteucci, S.; Morello, J. & Buzai, G.D. (2006). *Crecimiento urbano y sus consecuencias sobre el entorno rural*. Buenos Aires: Orientación Gráfica Editora.
- O'Sullivan, D. & Unwin, D. (2003). *Geographic Information Analysis*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Phlipponneau, M. (2001). *Geografía Aplicada*. Barcelona: Ariel.
- García, R. (2000). *Sistemas Complejos*. Barcelona: Gedisa.
- Samaja, J. (2004). *Epistemología y Metodología*. Buenos Aires: Eudeba.
- Tomlin, C.D. (1990). *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. New Jersey: Prentice Hall-Englewood Cliff.
- Tsai, Y. H. (2005). Quantifying Urban Form: Compactness versus 'Sprawl' *Urban Studies*, 42(1), 141-161.
- Viloria, F.; Arzani, H.; Migale, L.; Acuña, G. & Lanzelotti, S. 2011. Entre la arqueología, la historia y los recuerdos: la Pulpería de Villar en Mercedes (Buenos Aires). En: *Temas y problemas de la Arqueología Histórica, Tomo II*. Luján: UNLu, pp. 91-102.

# Caracterización socioespacial de la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina)

Baxendale Claudia<sup>1,2</sup>, Buzai Gustavo<sup>1,3</sup>

1 Instituto de Investigaciones Geográficas (INIGEO), Universidad Nacional de Luján  
Ruta Nacional N° 5 y Av. Constitución, (6700) Luján, Argentina

2 GEPAMA, FADU, Universidad de Buenos Aires

3 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
prodisig@unlu.edu.ar /  
www.prodisig.unlu.edu.ar

## RESUMEN

Estudiar la diferenciación areal es una tarea central del análisis geográfico. Las aproximaciones efectuadas por la Geografía Cuantitativa se realizan a través de la aplicación de procedimientos de análisis multivariado en la matriz de datos geográfica. La aplicación del linkage analysis brinda la posibilidad de obtener la regionalización del área de estudio. El presente trabajo incluye la regionalización de los partidos (municipios) de la cuenca del río Luján a través de procedimientos del análisis espacial cuantitativo. Se presentan los aspectos teórico-metodológicos para la construcción regional, el mapa de resultado y la especificidad de cada región a partir de la combinación de variables censales. Los resultados obtenidos pueden considerarse una herramienta para comprender la realidad socioespacial del área de estudio y poder generar acciones de planificación.

Palabras clave: **Cuenca del río Luján, Geografía Cuantitativa, Análisis Espacial, Linkage Analysis, Regionalización**

## ABSTRACT

*Studying areal differentiation is a central task of geographic analysis. The approaches made by quantitative geography are performed through the application of multivariate analysis procedures in the geographical data matrix. The application of the linkage analysis provides the possibility to obtain a regionalization of the study area. The present work includes the regionalization of the Partidos (Municipalities) of the Luján river basin through procedures of quantitative spatial analysis. The paper presents theoretical-methodological aspects are presented for the regional construction, the result map and the specificity of each region based on the combination of census variables. The results obtained can be considered as a tool to understand the socio-spatial reality of the study area and to generate planning actions.*

**Keywords: Lujan River Basin, Quantitative Geography, Spatial Analysis, Linkage Analysis, Regionalization.**

## I. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se enmarca en dos proyectos de investigación desarrollados por el Grupo de Estudios sobre Geografía y Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (GESIG) del Instituto de Investigaciones Geográficas (INIGEO)<sup>1</sup> de la UNLu y presenta la secuencia teórico-metodológica hacia la definición de la caracterización socioespacial de los municipios de la cuenca del río Luján en su definición geográfica de 16 unidades político-administrativas.

Con la finalidad de lograr resultados estructurales de la investigación se utilizan variables obtenidas del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010 (INDEC, 2010) y se aplican técnicas de análisis espacial cuantitativo con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Sistemas de Ayuda a la Decisión Espacial (SADE)<sup>2</sup> como el análisis de distribuciones espaciales por cartografía temática, Análisis Exploratorio de Datos Espaciales (ESDA, Exploratory Spatial Data Analysis) y procedimientos del análisis multivariado (Linkage Analysis) con finalidad de regionalización.

El análisis de las variables, a través de los procedimientos metodológicos mencionados, permiten determinar la estructura socioespacial del área de estudio como aproximación que lleva a construir una herramienta para el apoyo a la toma de decisiones en el ámbito del ordenamiento territorial.

## II. DEFINICIÓN ESPACIAL Y TEMÁTICA

La definición espacial de la cuenca hidrográfica se realiza desde su componente físico-natural a través de sus límites por la divisoria de aguas, en el caso de la cuenca del río Luján el trabajo de Lanzelotti y Buzai (2015) actualizan el de Buzai (2002) determinando un área geográfica de 3.778 km<sup>2</sup>. Desde un punto de vista político-administrativo la cuenca se encuentra contenida en el interior de 16 unidades espaciales correspondientes a los siguientes Partidos (correspondencia con el nivel municipal): Campana, Carmen de Areco, Chacabuco, Escobar, Exaltación de la Cruz, General Rodríguez, José C. Paz, Luján, Malvinas Argentinas, Mercedes, Moreno, Pilar, San Andrés de Giles, San Fernando, Suipacha y Tigre.

La definición temática implica la consideración de una serie de atributos numéricos medidos en cada una de las unidades espaciales. Las variables seleccionadas para la construcción de los indicadores son obtenidas de la base de datos REDATAM de INDEC (2010) disponible on-line.<sup>3</sup> Se focaliza sobre características generales de población y vivienda, situación socioeconómica de la población, hogares y viviendas.

Los datos obtenidos brindan la base digital que conforma los componentes centrales del SIG vectorial: la base de datos gráfica (base cartográfica) y la base de datos alfanumérica (datos censales). Ambas vinculadas con la finalidad de realizar el correspondiente tratamiento de análisis espacial de la información.

Desde el punto de vista cartográfico la definición de espacios homogéneos internos en las unidades espaciales en que se compone un área de estudio se puede realizar en diferentes escalas. Algunos trabajos de referencia estuvieron dirigidos a estudios nacionales (Velázquez, 2016) y regionales (Baxen-

dale et al., 2016; Principi y Buzai, 2016) a nivel departamental, espacios provinciales a nivel de Partido (Humacata y Buzai, 2016), el estudio de la estructura interna de la ciudad en fracciones censales (Buzai y Marcos, 2012), barrios (Baxendale, 2016) o radios censales (Buzai, 2014). Mediante estos antecedentes hemos abordado diferentes escalas espaciales que nos permiten evaluar positivamente el uso de Partidos para dar paso a aproximaciones posteriores en niveles de representación espacial de más detalle.

## III. ASPECTOS CONCEPTUALES

### ANÁLISIS ESPACIAL DESDE LA GEOGRAFÍA CUANTITATIVA

La investigación se basa en la Geografía como ciencia del Análisis Espacial, cuyo objeto material de estudio es el espacio geográfico representado con centralidad en la superficie terrestre. A partir de allí cuenta con tres grandes líneas de abordaje que definen su campo de actuación ante las diferentes posibilidades de estudio: (1) relación sociedad-naturaleza, (2) diferenciación espacial, y (3) leyes del comportamiento espacial.

El análisis espacial cuantitativo realizado en la presente aplicación se encuentra centrado en tres conceptos centrales de naturaleza espacial que permitirán captar la estructura espacial del área de estudio tanto en el espacio absoluto como relativo.

**Localización:** Todas las entidades y sus atributos tienen una localización específica en el espacio geográfico. Abordarlas desde el espacio absoluto les brindará un lugar fijo (coordenada geográfica) y desde el espacio relativo posiciones cambiantes (fricción espacial diferencial) a otras entidades. Los modelos espaciales se centran en el mejoramiento de posiciones.

**Distribución espacial:** El conjunto de entidades de un mismo tipo se reparten de una manera específica sobre el espacio geográfico. Este es un concepto central que permite todo estudio geográfico a partir del análisis de diferencias espaciales. La cartografía temática es la tarea técnica concreta que hace operativo el concepto.

**Asociación espacial:** El concepto considera el estudio de las correspondencias puestas en evidencia al comparar diferentes distribuciones espaciales las cuales pueden brindar hipótesis causales cuando se determina la variable dependiente. El método de superposición de mapas permite hacer operativo este concepto, pero este ha variado con el avance de la cuantificación desde el modelado cartográfico en SIG raster hasta la combinación por correlación numérica a partir de las columnas de la base de datos alfanumérica en SIG vectorial.

El concepto de localización lleva al análisis de datos individuales de cada unidad espacial (hecho geográfico), el de distribución espacial sustenta a la cartografía temática de variables y el de asociación justifica el cálculo de correlaciones que lleva a una regionalización como síntesis espacial.

### CARACTERIZACIÓN SOCIOESPACIAL PARA UN DIAGNÓSTICO

Desde una perspectiva geográfica, los procedimientos realizados en el diagnóstico serán los que permiten avanzar en una investigación tendiente a comprender la estructura y funcio-

1 Proyectos PICT 2014-1388 (Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica, ANPCyT) y CDD-CS 124/16 (Departamento de Ciencias Sociales, UNLu), ambos dirigidos por G.Buzai.

2 SIG: Quantum GIS (QGIS). SADE: GeoDa - ASU GeoDa Center. Ambos utilizados en el Laboratorio de Análisis Espacial y Sistemas de Información Geográfica (LabSIG) del INIGEO-UNLu.

3 [www.indec.gov.ar](http://www.indec.gov.ar) link: Base de datos: Redatam Censo 2010.



namiento del territorio, entendido como sistema socioespacial compuesto por el subsistema físico y el subsistema humano.

La tarea global considera la realización de diagnósticos específicos para cada componente y un diagnóstico integral que funciona como síntesis geográfica que da cuenta de la estructura en forma y función del área de estudio.

En Buzai y Baxendale (2012) realizamos un análisis detallado de la etapa de diagnóstico y de las capacidades que le brinda el SIG en dicha tarea. Apoyan concretamente la perspectiva espacial en los diagnósticos del subsistema humano (demográfico-poblacional y económico-productivo) y en el subsistema físico (medio natural y medio construido, este último con contenido humano pasa al económico-productivo).

El diagnóstico socioespacial planteado en esta investigación se inserta de manera central en el subsistema humano al considerar a la población como elemento central debido a sus múltiples influencias: toma recursos del medio y los adapta a sus actividades, crea el medio construido para convertirlo en espacio funcional y es el destinatario de las acciones finales del Ordenamiento Territorial, que en última instancia tiene como prioridad el mejoramiento de las condiciones de vida de la población.

#### IV. METODOLOGÍA

##### BASE CARTOGRÁFICA

La base cartográfica representa la materialización del área de estudio en el entorno SIG y con ella son espacializados los datos de las diferentes variables censales. Fue considerado el soporte digital en escala 1:250.000 puestos a disposición por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y la Dirección Provincial de Estadística (DPE) de la Provincia de Buenos Aires.

Al no coincidir espacialmente de manera perfecta ambas bases cartográficas la primera tarea técnica es su ajuste basado en la digitalización en el SIG utilizando imágenes disponibles de Bing Maps como referencia espacial de anclaje.

La tarea realizada tiene como objetivo generar consistencia en la base de datos gráfica del proyecto. La puesta a disposición de imágenes satelitales de alta resolución, algunas ubicadas en un globo terráqueo virtual (GTV) como Google Earth, brinda nuevas posibilidades a estos procedimientos. Su incorporación como base de la cartografía digital obtenida, las posibilidades flexibles para el tratamiento gráfico de entidades geométricas y finalmente, la generación de archivos en formatos que permiten una directa vinculación con el SIG son indicadores que muestran a una nueva etapa en los trabajos técnicos de cartografía digital automatizada.

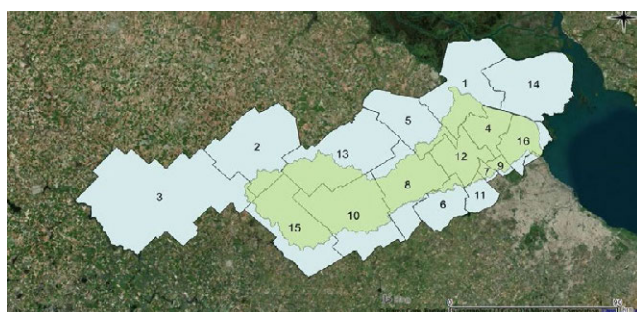


Figura 1. Cuenca del río Luján. Base cartográfica. Partidos (Municipios)

- (1) Campana, (2) Carmen de Areco, (3) Chacabuco, (4) Escobar, (5) Exaltación de la Cruz, (6) General Rodríguez, (7) José C. Paz, (8) Luján,

- (9) Malvinas Argentinas, (10) Mercedes, (11) Moreno, (12) Pilar, (13) San Andrés de Giles, (14) San Fernando, (15) Suipacha y (16) Tigre / © GESIG\_INIGEO

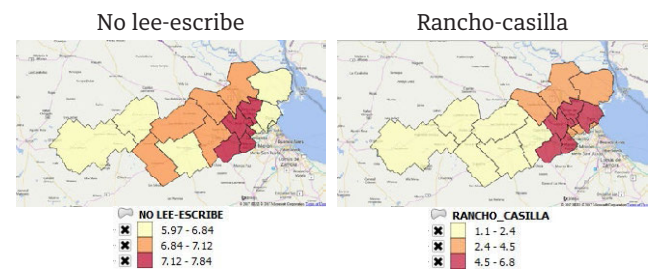
##### CARTOGRAFÍA TEMÁTICA

El mapeo y análisis de la distribución espacial de características socio-habitacionales en el área de estudio es central en el proyecto.

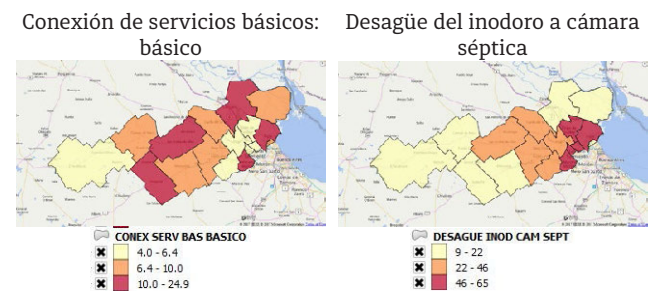
La cartografía temática como campo científico tiene por objetivo la realización de mapas de cualquier tema que exceda la representación sobre el terreno y, de esta manera, constituye la base para diversos tipos de diagnósticos espaciales con propósitos específicos

En un nivel de mayor profundidad cada capa temática puede ser considerada un mapa de tratamiento (Buzai et al., 2016) y con ellas avanzar hacia el análisis de asociaciones espaciales entre temas y verificar la correlación entre diferentes distribuciones espaciales. Técnicamente esto se resuelve mediante la superposición de mapas en SIG raster y la combinación numérica de las columnas (variables) de la tabla de atributos en SIG vectorial.

##### VARIABLES DE COSTO



##### VARIABLES INTERMEDIAS



##### VARIABLES DE BENEFICIO

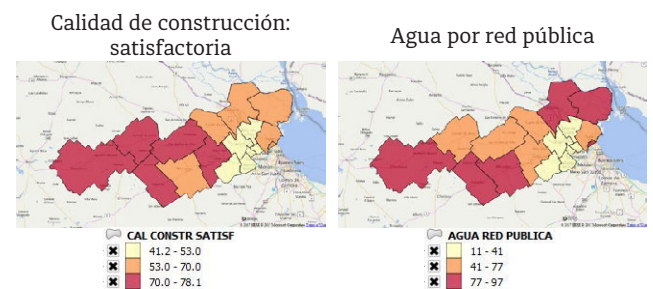


Figura 2. Distribución espacial de variables seleccionadas

## ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS ESPACIALES

El análisis exploratorio de datos espaciales (ESDA, Exploratory Spatial Data Analysis) constituye una serie de procedimientos de gran utilidad al momento de abordar el estudio de relaciones espaciales entre las diferentes distribuciones espaciales en el área de estudio.

El objetivo es que en la etapa de diagnóstico el proyecto pueda contar con información estructural del comportamiento de una variable (univariado) y de las relaciones existentes entre dos variables (bivariado).

En el nivel univariado se avanza sobre la cartografía temática a partir de incorporar gráficos como el histograma (análisis de frecuencias) y el gráfico de caja (boxplot) para el descubrimiento de casos extremos. En el nivel bivariado se utilizan procedimientos que permiten la comparación entre variables, técnicas que se apoyan en el gráfico de dispersión (scatterplot) y el cálculo del valor de correlación  $r$  de Pearson.

La Figura 3 presenta el análisis de la relación entre dos variables de costo: una de pobreza y una educativa

## ANÁLISIS MULTIVARIADO

Los procedimientos del análisis multivariado resultan de gran importancia en el análisis espacial cuantitativo, tanto para el estudio de variables como de unidades espaciales. En el primer caso se generan macro-variables y en el segundo regiones.

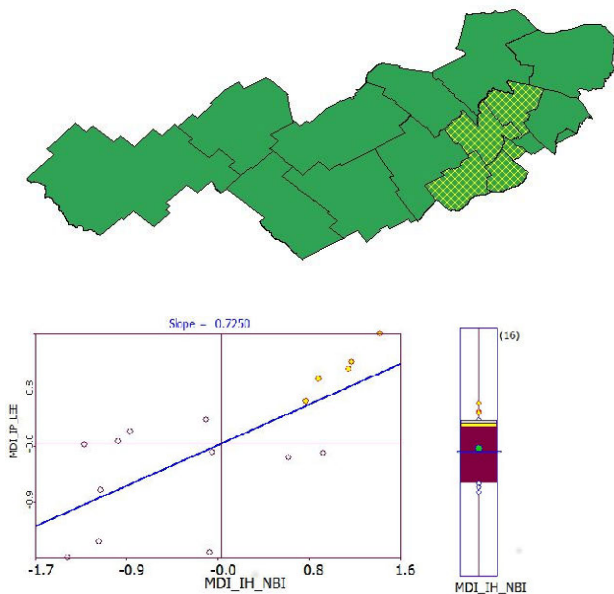


Figura 3. Análisis bivariado entre población en hogares con NBI y Variable educativa No lee-escribe

En trabajos previos (Buzai, 2003; 2014) hemos comprobado la buena aptitud del método Linkage Analysis para la realización de la síntesis de las distribuciones espaciales para la definición de mapas sociales.

Hemos realizado la matriz de datos originales (MDO) incluyendo los datos originales en valores absolutos y su transformación a matriz de datos índice (MDI) a partir del cálculo de indicadores. Las variables seleccionadas son aquellas que permiten una buena discriminación del mapa social, hay variables de costo y de beneficio, junto a otras que posiblemente indiquen situaciones intermedias.

A partir de allí se genera la matriz de datos estandarizados (MDE) a través del coeficiente  $r$  de Pearson como base para la aplicación del Linkage Analysis en la matriz de correlaciones de variables y la matriz de correlaciones de unidades espaciales

## INDICADORES UTILIZADOS

- IV\_RANC: Ranchos y casillas sobre el total de viviendas particulares
- IV\_DEPTO: Departamentos sobre el total de viviendas particulares
- IV\_CASAS: Casas sobre el total de viviendas particulares
- IV\_CCS: Calidad constructiva de la vivienda satisfactoria sobre el total de vivienda particulares con personas presentes
- IV\_CCB: Calidad constructiva de la vivienda básica sobre el total de vivienda particulares con personas presentes
- IV\_CCI: Calidad constructiva de la vivienda insuficiente sobre el total de vivienda particulares con personas presentes
- IV\_CSBS: Calidad de conexión de los servicios básicos satisfactorio sobre el total de viviendas particulares con personas presentes.
- IV\_CSBB: Calidad de conexión de los servicios básicos básico sobre el total de viviendas particulares con personas presentes
- IV\_CSBI: Calidad de conexión de los servicios básicos insuficiente sobre el total de viviendas particulares con personas presentes
- IH\_ARP: Procedencia del agua para beber y cocinar por red pública sobre el total de hogares
- IH\_AMOT: Procedencia del agua para beber y cocinar por bomba a motor sobre el total de hogares
- IH\_AMAN: Procedencia del agua para beber y cocinar por bomba manual sobre el total de hogares
- IH\_APOZ: Procedencia del agua para beber y cocinar por pozo-cisterna-lluvia sobre el total de hogares
- IH\_BLN: Hogares sin baño o letrina sobre el total de hogares
- IH\_DIRP: Hogares con desagüe del inodoro a red pública sobre el total de hogares
- IH\_DICAM: Hogares con desagüe del inodoro a cámara séptica sobre el total de hogares
- IH\_DIPOZ: Hogares con desagüe del inodoro a pozo sobre el total de hogares
- IH\_DIHOY: Hogares con desagüe del inodoro a hoyo-excavación sobre el total de hogares
- IH\_CGRP: Hogares con combustible usado principalmente para cocinar gas de red sobre el total de hogares
- IH\_CGTUB: Hogares con combustible usado principalmente para cocinar gas en tubo sobre el total de hogares
- IH\_CGGAR: Hogares con combustible usado principalmente para cocinar gas en garrafa sobre el total de hogares
- IH\_CLCO: Hogares con combustible usado principalmente para cocinar leña, carbón u otro sobre el total de hogares
- IH\_HAC4: Hogares con más de 3 personas por cuarto
- IH\_NBI: Hogares con al menos un indicador de NBI
- INDMASC: Índice de masculinidad
- ED\_014: Población de 0 a 14 años sobre el total de población
- ED\_1564: Población de 15 a 64 años sobre el total de población
- ED\_65M: Población de 65 años y más sobre el total de población
- IP\_LEENO: Población que no tiene la capacidad de leer y escribir sobre el total de población de 3 años y más (aparentemente)
- IP\_EDSUP: Población que cursa o curso el nivel educativo superior no universitario, universitario y pos-universitario sobre el total de población de 25 años y más
- IP\_OCUP: Población ocupada sobre el total de población de 14 años y más
- IP\_DESOC: Población desocupada sobre el total de población de 14 años y más

IP\_INAC: Población inactiva sobre el total de población de 14 años y más

**RESULTADOS DEL ANÁLISIS MULTIVARIADO**

*Macrovariables*

La aplicación del procedimiento multivariado denominado Linkage Analysis aplicado en la matriz de correlaciones de variables (MCV) tiene como objetivo generar grupos de variables con comportamientos similares (Buzai, 2014).

El procedimiento dio como resultado seis grupos (macrovariables) organizados a partir de los pares recíprocos (núcleos) de máxima correlación y que, en la Figura 4, se encuentran representados en línea gruesa. A partir de allí se une las variables y se consignan los resultados numéricos del coeficiente de correlación de Pearson de las diferentes relaciones.

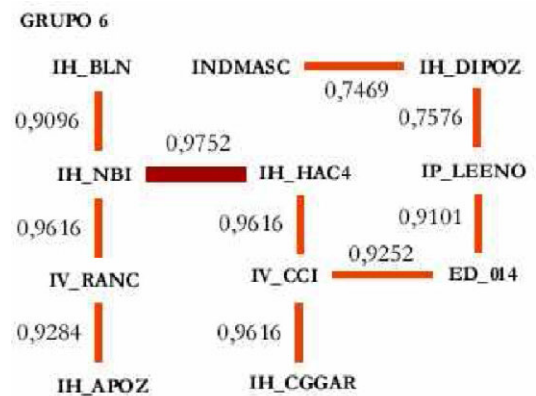


Figura 4. Linkage Analysis en variables

Las 33 variables quedan resumidas en 6 grupos. Entre ellos encontramos los que se asocian con situaciones espaciales que tienden a ser buenas (Grupo 2), medias (Grupo 1) y malas (Grupo 6). El procedimiento tiene por objetivo simplificar la interpretación del conjunto de variables.

*Unidades espaciales*

Cuando el procedimiento de linkage analysis se aplica a la matriz de correlaciones de unidades espaciales (MCUE) se obtienen grupos de unidades espaciales que representados en el mapa muestran la regionalización.

A continuación, la Figura 5, incluye los resultados del procedimiento.

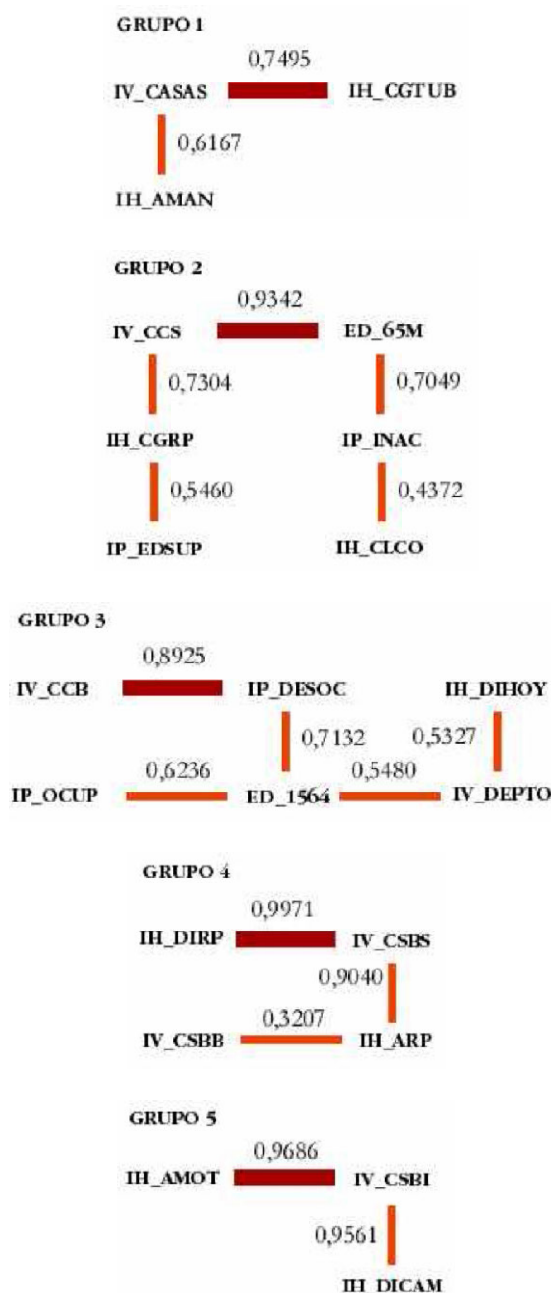


Figura 5. Linkage Analysis en unidades espaciales

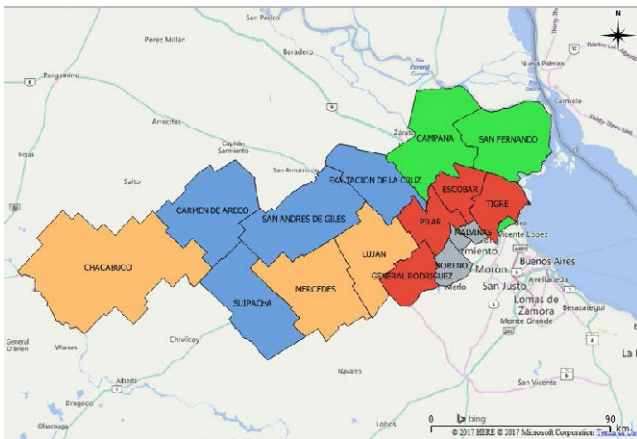


Figura 6. Regionalización

El cálculo de los promedios de los valores de puntajes estándar (z) de cada par recíproco permite obtener la especificidad de cada grupo en base al valor que cada variable tiene en su interior.

**TABLA I**  
CUANESPECIFICIDAD DE LAS REGIONES

Indicador	G1	G2	G3	G4	G5
IV_RANC	-0,073	-0,892	-1,332	0,892	0,569
IV_DEPTO	2,076	-0,866	-0,168	0,092	-0,610
IV_CASAS	-1,913	1,082	0,606	-0,391	0,354
IV_CCS	0,382	0,851	1,051	-0,869	-1,263
IV_CCB	0,153	-1,038	-0,748	0,589	1,208
IV_CCI	-0,652	-0,658	-1,120	0,942	1,167
IV_CSBS	1,261	0,111	1,490	-0,798	-1,303
IV_CSBB	-0,098	0,631	-0,436	-0,838	-0,695
IV_CSBI	-1,228	-0,259	-1,376	0,989	1,457
IH_ARP	1,308	0,422	1,114	-1,086	-1,482
IH_AMOT	-1,292	-0,483	-1,080	1,069	1,532
IH_AMAN	-1,371	1,814	-0,281	-0,003	-0,302
IH_APOZ	-0,071	-0,666	-1,353	1,225	0,301
IH_BLN	0,056	-0,821	-1,176	0,680	1,294
IH_DIRP	1,220	0,089	1,469	-0,811	-1,355
IH_DICAM	-1,241	-0,431	-1,213	0,751	1,620
IH_DIPOZ	-0,867	0,689	-1,589	0,709	0,414
IH_DIHOY	1,530	-0,305	-1,165	0,140	-0,858
IH_CGRP	1,312	-0,278	0,695	-0,958	-0,405
IH_CGTUB	-1,304	1,037	0,647	0,113	-0,729
IH_CGGAR	-1,099	-0,025	-0,791	1,009	0,608
IH_CLCO	0,126	0,177	0,800	-0,708	-1,126
IH_HAC4	-0,159	-1,060	-1,134	0,974	0,929
IH_NBI	-0,094	-1,020	-1,260	0,978	0,904
INDMASC	-0,561	1,019	-1,082	0,430	-0,081
ED_014	-0,679	-0,648	-1,289	1,194	0,602
ED_1564	1,064	-0,696	-1,039	0,452	0,660
ED_65M	0,192	0,826	1,514	-1,210	-0,772
IP_LEENO	-0,882	-0,333	-1,585	0,910	0,392
IP_EDSUP	0,921	-0,452	0,544	0,337	-1,553
IP_OCUP	0,018	-0,405	-0,922	1,281	-0,354
IP_DESOC	0,462	-1,410	-0,845	0,548	1,209
IP_INAC	-0,185	0,853	1,070	-1,257	-0,153

La interpretación de la Tabla I permite caracterizar los grupos a través de la sistematización presentada en las tablas II y III, las cuales se presentan como base de la interpretación de las características socioespaciales del área de estudio.

**TABLA II**  
CARACTERIZACIÓN DE GRUPOS (PARTE 1)

REGIÓN	SITUACIÓN GENERAL	ESTRUCTURA DE LA POBLACIÓN	TIPO DE VIVIENDA Y CALIDAD CONSTRUCTIVA DE LA VIVIENDA
Grupo 1	Buena	Valores altos para el grupo de edad de 15 a 64 años.	Valores muy altos para Departamentos
Grupo 2	Media	Valores altos para el grupo de edad de población anciana y para el índice de masculinidad	Valores altos para viviendas tipo Casa, y calidad constructiva satisfactoria
Grupo 3	Buena	Valores altos para la población anciana	Valores altos para vivienda tipo Casa y calidad constructiva Satisfactoria
Grupo 4	Mala Periurbana	Valores altos para el grupo etario joven (0 a 14 años)	Valores altos para la vivienda tipo Rancho y valor medio-alto para calidad constructiva Básica y alto para calidad Insatisfactoria
Grupo 5	Mala Urbana	Valores altos del grupo etario joven (0 a 14 años) y adulto (15 a 64 años)	Valor medio-alto para el tipo de vivienda correspondiente a Rancho y valores altos para calidad constructiva Básica e Insatisfactoria

**TABLA III**  
CARACTERIACIÓN DE GRUPOS (PARTE 2)

REGIÓN	CALIDAD DE CONEXIÓN A SERVICIOS BÁSICOS, SERVICIOS AGUA, DESAGÜE Y GAS.	EDUCACIÓN SUPERIOR Y CALIDAD DE VIDA BÁSICA	CONDICIÓN DE OCUPACIÓN DE LA POBLACIÓN ECONÓMICAMENTE ACTIVA
Grupo 1	Satisfactoria. Conexiones del suministro de agua, gas y desagües cloacales a red pública	Valores altos para la población mayor de 25 años que cursa o cursó educación superior. Valores medios para NBI y hacinamiento	No define
Grupo 2	Básico. Valores altos para agua por bomba manual, gas en tubo y desagües del inodoro a pozo	Valores bajos para el NBI y hacinamiento	Valores altos para la población inactiva
Grupo 3	Satisfactoria. Valores altos para suministro de agua y desagüe cloacal a red pública. Diversidad en combustible usado principalmente para cocinar al presentar valores altos para gas por red pública, gas en tubo y el uso de leña o carbón.	Valores altos para la población con educación superior y bajos para NBI y hacinamiento	Valores altos para la población inactiva
Grupo 4	Insatisfactoria. Valores altos de procedencia del agua por bomba a motor y pozo, del desagüe del inodoro a cámara séptica y pozo y del gas para cocinar en garrafa.	Valores altos de hogares con NBI y hacinamiento y de hogares sin baño o letrina.	Valores altos de población ocupada y valor medio-alto de población desocupada.
Grupo 5	Insatisfactoria. Valores muy altos de agua procedente de bomba a motor y desagüe del inodoro a cámara.	Valores muy bajos de población mayor a 25 años con estudios superiores. Valores altos de hogares con NBI, hacinamiento y sin baño o letrina.	Valor alto de la población de 14 años y más cuya condición de actividad es Desocupada

## V. CONCLUSIONES

A lo largo de estas páginas fueron presentados aspectos centrales del análisis espacial cuantitativo con ejemplos teóricos y metodológicos de sus formas de abordaje. A partir de las posibilidades de aproximación contextual a la realidad espacial del área de estudio se obtienen resultados que brindan un panorama general de la situación socioespacial de la población de la cuenca del río Luján.

Los aspectos conceptuales de la Geografía Cuantitativa, de las metodologías de análisis espacial, muchas de ellas desarrolladas en el ámbito de los SIG y SADE, son el ámbito para la obtención e interpretación de resultados espaciales. De esta manera se generan los elementos que constituyen la base para la realización del diagnóstico socioespacial como paso inicial y fundamental que brinda la actividad académica con posibilidad de transformarse en ciencia aplicada al momento de la implementación de propuestas.

## REFERENCIAS

- Baxendale, C.A. 2016. Análisis socio-habitacional de los barrios de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires: estudio contextual para la asociación de la ubicación de áreas verdes urbanas. *Fronteras*. 14:38-45
- Baxendale, C.A.; Buzai, G.D. & Morina, J.O. (2016) La Región Metropolitana de Buenos Aires. En: Velázquez, G.A. (comp.) *Geografía y Calidad de Vida en Argentina. Análisis regional y departamental 2010*. Tandil: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. pp. 261-281.
- Buzai, G.D. (2002) Atlas digital de la cuenca del río Luján. Versión CD. Luján: Universidad Nacional de Luján.
- Buzai, G.D. (2014) Mapas Sociales Urbanos. Buenos Aires: Lugar Editorial. (primera edición, 2003).
- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A. (2012) Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Tomo 2: Ordenamiento territorial y temáticas de base vectorial. Buenos Aires: Lugar Editorial.
- Buzai, G.D. & Baxendale, C.A.; Humacata, L.; Principi, N. (2016) Sistemas de Información Geográfica. Cartografía Temática y Análisis Espacial. Buenos Aires: Lugar Editorial.
- Buzai, G.D. & Marcos, M. (2012) The Social Map of Greater Buenos Aires as Empirical Evidence of Urban Models. *Journal of Latin American Geography*. 11, 1, 67-78.
- Humacata, L. & Buzai, G.D. (2016) Análisis espacial para la regionalización de la Provincia de Buenos Aires. En: Buzai, G.D.; Baxendale, C.A.; Humacata, L.; Cacace, G.; Delfino, H.; Lanzelotti, S.L.; Principi, N. *Geografía y Análisis Espacial. Aplicaciones urbano-regionales con Sistemas de Información Geográfica*. Luján: Editorial de la Universidad Nacional de Luján (EdUNLu).
- INDEC (2010) Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas. Buenos Aires: Instituto Nacional de Estadística y Censos.
- Lanzelotti, S.D. & Buzai, G.D. (2015) Delimitación de la cuenca del río Luján, Provincia de Buenos Aires, Argentina. Informe Técnico 01 - 19 de Octubre. PICT 2014-1388. Luján: INIGEO.
- Principi, N. & Buzai, G.D. (2016) Análisis espacial para la determinación de la estructura socioespacial del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. En: Buzai, G.D.; Baxendale, C.A.; Humacata, L.; Cacace, G.; Delfino, H.; Lanzelotti, S.L.; Principi, N. *Geografía y Análisis Espacial. Aplicaciones urbano-regionales con Sistemas de Información Geográfica*. Luján: Editorial de la Universidad Nacional de Luján (EdUNLu).
- Velázquez, G.A. (2016) *Geografía y Bienestar*. Buenos Aires: Editorial Universitaria de Buenos Aires (EUDEBA).



# Disponibilidad y accesibilidad a los espacios verdes públicos en la ciudad de Río Cuarto (Argentina)

Galfioni María de los Angeles<sup>1</sup>, Degioanni Américo José<sup>2</sup> y Maldonado Gabriela Inés<sup>3</sup>

1 Departamento de Geografía/Facultad de Ciencias Humanas /Universidad Nacional de Río Cuarto  
Río Cuarto/Córdoba/Argentina  
mgalfioni@hum.unrc.edu.ar

2 Departamento de Ecología Agraria/Facultad de Agronomía y Veterinaria/Universidad Nacional de Río Cuarto  
Río Cuarto/Córdoba/Argentina  
adegioanni@ayv.unrc.edu.ar

3 CONICET-Departamento de Geografía/Facultad de Ciencias Humanas/Universidad Nacional de Río Cuarto  
Río Cuarto/Córdoba/Argentina  
gimaldonado@hum.unrc.edu.ar

## RESUMEN

Los espacios verdes públicos cumplen un importante rol para una adecuada calidad de vida urbana. Sin embargo, las actuales tendencias de crecimiento urbano difuso, con fuerte demanda de suelo para urbanizar, ponen en riesgo la creación, preservación y gestión de los espacios verdes públicos. Desde esta perspectiva, el objetivo de este trabajo consiste en diagnosticar la disponibilidad y accesibilidad de la población a los espacios verdes públicos de la ciudad de Río Cuarto (Argentina), en el marco de los patrones de crecimiento urbano que ha experimentado entre 1980-2013.

A partir de fuentes cartográficas del Municipio y con control de campo, se confeccionaron en SIG las capas de población y espacios verdes públicos. Esta última capa fue categorizada de acuerdo al tamaño del espacio y posteriormente se generó un buffer para cada categoría con la máxima distancia recomendada para el acceso a pie. Por último, mediante una operación de superposición entre las capas población y espacios verdes se determinó el porcentaje de población que tiene acceso a los mismos. Los resultados obtenidos demuestran, por un lado, un sector urbano consolidado con una disponibilidad promedio de espacios verdes de 28,5 m<sup>2</sup> por cada habitante, con un índice de accesibilidad a pie promedio del 0,43 de la población. Por otro lado, en el área de crecimiento urbano difuso (área urbano-rural) la disponibilidad promedio es de 3,7 m<sup>2</sup> por habitante con una accesibilidad promedio solo del 0,8 de la población. Estos resultados demuestran que si bien la ciudad en su área urbana consolidada cuenta con una adecuada disponibilidad de espacios verdes su distribución no es óptima ya que menos de la mitad de la población accede a la misma en condiciones aconsejadas. Esta situación se profundiza en los sectores de expansión difusa en los cuáles no se disponen de espacios verdes y la accesibilidad es muy baja.

Palabras clave: **Espacios verdes públicos, crecimiento urbano, planificación urbana, Sistemas de Información Geográfica (SIG).**

## ABSTRACT

*Public green spaces comply an important role for an adequate quality of urban life. However, present tendencies diffuse urban growth, with strong demand for land to urbanize, place at danger the creation, preservation and management of public green spaces. From*

*this perspective, the objective of this work is to diagnose the availability and accessibility of the population to the public green spaces of the city of Río Cuarto (Argentina), within the frame work of urban growth patterns that it has experienced between 1980 and 2013.*

*From cartographic sources of the Municipality and with field control, the layers of population and public green spaces were made in GIS. This last layer was categorized according to the size of the space and later a buffer was generated for each category with the maximum distance recommended for foot access. Last, through an operation of superposition between the layers population and green spaces was determined the percentage of population that has access to the. The results obtained demonstrate, on the one hand, a consolidated urban sector with an average availability of green spaces of 28.5 m<sup>2</sup> per habitant, with an average accessibility index of 0.43 of the population. On the other hand, in the area of diffuse urban growth (urban-rural area) the average availability is 3.7 m<sup>2</sup> per habitant with an average accessibility of only 0.8 of the population. These results demonstrate that although the city in its consolidated urban area has an adequate availability of green spaces, its distribution is not optimal since less than half of the population accesses it under advised conditions. This situation is deepened in sectors of diffuse expansion in which there are no green spaces and accessibility is very low.*

**Keywords:** *Public green spaces, Urban growth, urban planning, Geographic information systems (GIS).*

## I. INTRODUCCIÓN

Los espacios verdes públicos se constituyen en uno de los principales articuladores e integradores de la vida social como lugares de encuentro, intercambio y esparcimiento. A su vez, contribuyen a: la oxigenación a través de la absorción del bióxido de carbono que contamina la atmósfera, regulación de las temperaturas y la humedad así como también permiten la filtración de los vientos reduciendo su velocidad (Falcón, 2007, Guerrero y Culós, 2007; Gómez Lopera, 2005; Rendón Gutiérrez, 2010; Sorensen et al, 1998). También actúan como reguladores de las inundaciones, manteniendo la permeabilidad del suelo y la capacidad de filtración (Reyes Pácke y Figueroa Alcance, 2010). En consecuencia, una adecuada disponibilidad, distribución y accesibilidad de la población a dichos espacios redundan en una mejor calidad ambiental y social urbana.

Sin embargo, es bastante frecuente encontrar ciudades con fuerte desequilibrio en los valores de referencia sobre la disponibilidad de espacios verdes públicos según los patrones de crecimiento urbano que van adoptando. El consumo de tierras para urbanizar con carencia de normativas que regulen la disponibilidad y accesibilidad a los espacios verdes públicos, se constituye en uno de los puntos de debate para generar ciudades más sostenibles y en nuevos retos para los municipios.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) establece como parámetro mínimo 9 m<sup>2</sup> de espacios verdes por habitante, mientras que para la Organización de las Naciones Unidas (ONU) el valor ideal de área verde es de 16 m<sup>2</sup>/hab. Esto demuestra la falta de un criterio único para establecer la cantidad recomendable de espacio verde por habitante entre los diversos organismos internacionales, por lo tanto se consideró como parámetros óptimos la disponibilidad de entre 10 y 15 m<sup>2</sup> de superficie verde por habitante (Tella y Potocko, 2009), cuya distribución sea proporcional en relación a la densidad de población.

No obstante, no sólo es importante considerar la superficie por habitante sino que también es necesario analizar la distribución espacial de los espacios verdes públicos y la proximidad a los mismo en relación a la distancia que una persona puede caminar en un período de tiempo no mayor a 10 minutos, en relación al tamaño del espacio verde. De esta manera,

estas medidas permiten generar un diagnóstico más exhaustivo de la situación actual de los espacios verdes públicos.

Desde esta perspectiva, el objetivo de este trabajo consiste en diagnosticar la disponibilidad y accesibilidad de la población a los espacios verdes públicos de la ciudad de Río Cuarto (Argentina), en el marco de los patrones de crecimiento urbano que ha experimentado entre 1980-2013. Esta ciudad de tamaño intermedio (157.010 habitantes) posee un crecimiento urbano de tipo difuso, en el cual se evidencian dos procesos. Por un lado, una densificación de sus zonas céntricas del área urbana consolidada; y por otro lado, una expansión del medio construido hacia sus periferias de forma discontinua y que conforma un área de transición urbana - rural de baja densidad poblacional.

En el marco de estos rasgos tendenciales de crecimiento urbano que se viene evidenciando en el área de estudio, los espacios verdes públicos son cada vez más presionados por la densificación urbana, generando conflictos en términos ambientales, sociales y estéticos.

Si bien, en los últimos años se han realizado importantes intervenciones en la recuperación y refuncionalización de áreas verdes públicas- como por ejemplo en la ribera del Río Cuarto- aún permanecen grandes diferencias de dotación de espacios verdes públicos en el área urbana consolidada y zonas de reciente expansión urbana, lo que termina condicionando la accesibilidad de la población a este tipo de espacios.

En cuanto a la normativa vigente, en el Plan de Ordenamiento urbano y el Código ambiental de la ciudad de Río Cuarto, se destinan algunos artículos a la regulación de los espacios verdes públicos, fundamentalmente en cuanto a la conservación, mantenimiento, ubicación y uso. Pese a ello, carece de la designación de indicadores de disponibilidad y accesibilidad a los espacios verdes públicos, que permitan una distribución más equitativa de dichos espacios.

Dicho cuadro de situación plantea la necesidad de contar con un diagnóstico acerca de la situación actual de los espacios verdes públicos en términos de disponibilidad, distribución y accesibilidad, que aporten al diseño de políticas urbanas en relación a la importancia de la gestión, conservación y mantenimiento de los espacios verdes públicos en pos de una mejora en la calidad ambiental y social en los espacios urbanos.



## II. MÉTODO

### CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DEL ESTUDIO

La ciudad de Río Cuarto se localiza en el sector sudoeste de la provincia de Córdoba (Argentina) en el departamento y pedanía homónimos, a los 33° 00' y 33° 10' de latitud sur y 64° 15' y 64° 30' de longitud oeste (figura 1).

Dicha ciudad de tamaño intermedio con una población de 157.010 habitantes -según el Censo Nacional de Población y Viviendas del año 2010-, es el segundo centro urbano más importante de la provincia de Córdoba con relación a la cantidad de habitantes y servicios que ofrece -comerciales, financieros, educativos y de salud-, por lo que se constituye en la capital alterna de la provincia.

A partir de trabajos previos (Galfioni et al, a) 2013, b) 2015) se identificó que los patrones de crecimiento urbano que ha experimentado la ciudad de Río Cuarto entre 1980-2013 se asimilan, en rasgos generales, a un modelo de ciudad difusa. En el cual se identifica, en primer lugar, un incremento de la superficie urbana construida a un ritmo mayor que la población, lo que ha contribuido a generar una baja densidad poblacional, sobre todo en las zonas de reciente expansión en la periferia del área de estudio.

En segundo lugar, se evidencia una discontinua ocupación del territorio (figura 2), producto de una falta de consolidación de áreas intersticiales vacantes y espacios desvinculados del área urbana consolidada. Este patrón de comportamiento ha contribuido a la reconversión de tierra rural a urbana y a la difuminación de los límites entre lo urbano-rural. Si bien para el año 2013, se amplía el ejido urbano de 6.000 a 8.500 ha., se observa que las tendencias de ocupación urbana discontinua se siguen intensificando.

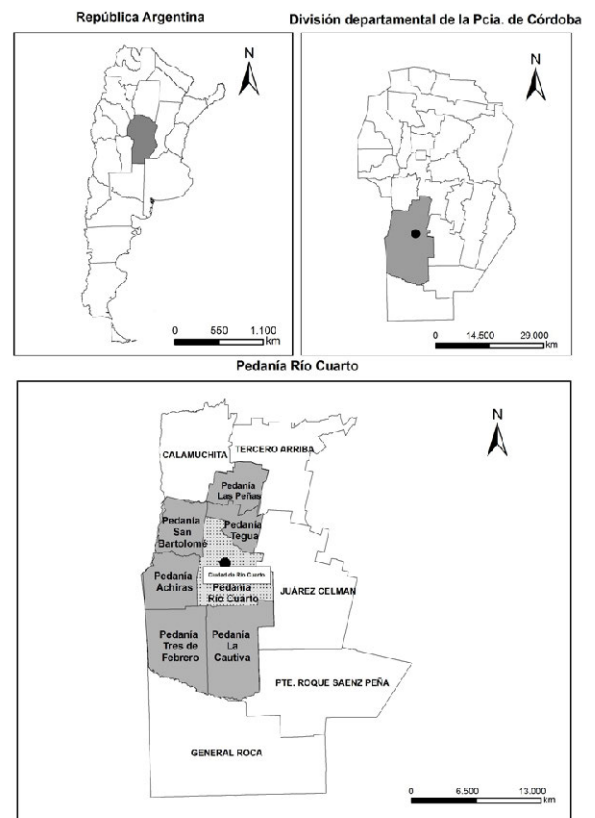
En tercer lugar, y por último, se detectan dos procesos concomitantes, por un lado un proceso de suburbanización poblacional y habitacional semejante a los rasgos enunciados en el modelo difuso, con un proceso de densificación en algunos sectores del centro de la ciudad. En este sentido, se evidencia que pese a que la periferia ha experimentado un aumento de viviendas ocupadas, no ha implicado necesariamente un desdoblamiento de algunos sectores de la zona central.

Dicho cuadro de situación, ha permitido diferenciar dos subáreas con dinámicas poblacionales y habitacionales diferentes, así como también de una demanda de infraestructura y servicios urbanos, entre ellos específicamente lo vinculado a la disponibilidad y accesibilidad a los espacios verdes públicos. Dichas subáreas comprenden (figura 3):

- un área urbana consolidada comprendida por los radios censales urbanos que posee una superficie de 6.000 ha., que cuenta con 157.010 hab.
- un área de transición urbano-rural de reciente expansión, que se ubica entre los límites del área urbana consolidada y del polígono envolvente de la mancha urbana registrada para el año 2013, ajustada en función de los radios censales rurales de 2010 cuya superficie es de 3.746 ha, cuyo interior nuclea a un promedio de 274 habitantes.

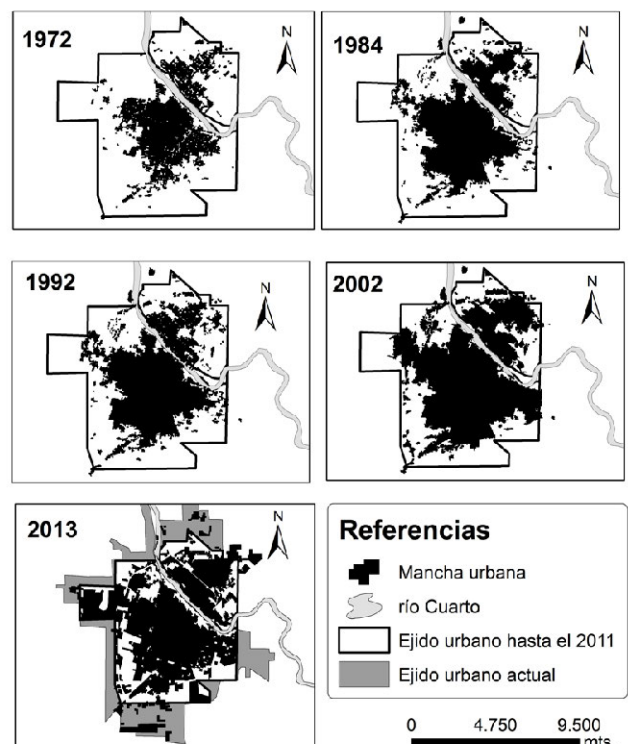
### MATERIALES Y MÉTODOS

Para el análisis territorial y estadístico de este trabajo se confeccionó un Sistema de Información Geográfica (SIG) con las capas de población y espacios verdes públicos.



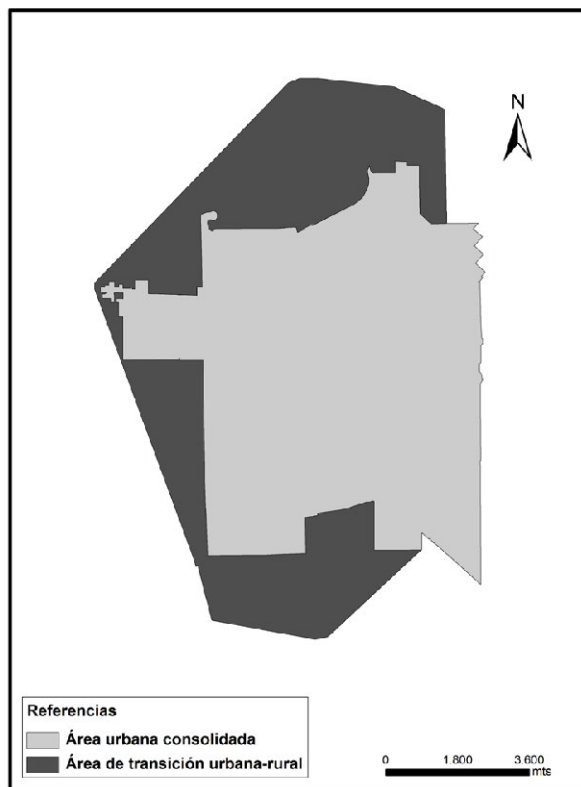
Fuente: elaboración propia. Año 2017.

Figura 1. Localización del área de estudio



Fuente: Trabajos previos de Maldonado y Campanella (2004), obtenidos de fotografías satelitales para distintos períodos, con la actualización para el año 2013. Año:2017

Figura 2. Evolución de la superficie urbana construida en la ciudad de Río Cuarto (Argentina) entre 1972-2013



Fuente: elaboración propia. Año: 2017

Figura 3. Diferenciación del área urbana consolidada y de transición urbano-rural derivados de los patrones de crecimiento urbano entre 1980-2013

#### a) Población

Con base en los datos de población del Censo Nacional de población y vivienda y la capa de radios censales urbanos y rurales proporcionadas por Estadística de Córdoba, se determinó la cantidad de población y su distribución a nivel de radio censal.

#### b) Disponibilidad y accesibilidad a los espacios verdes públicos

A partir de la información proporcionada por el municipio de la ciudad de Río Cuarto en su SIG con control de campo, se digitalizaron los espacios verdes públicos presentes en el área de estudio. Luego, se procedió a determinar la disponibilidad de espacios verdes públicos por subáreas para lo cual se calculó la superficie de cada espacio y fueron categorizados según el tamaño: hasta 34.999 m<sup>2</sup>; entre 35.000 y 99.999 m<sup>2</sup> y más de 100.000 m<sup>2</sup>. Dicha información permitió determinar: la cantidad y superficie de espacios verdes públicos por categoría, participación porcentual del total de superficie de dichos espacios por subárea y por cada categoría, conjuntamente a la disponibilidad de espacios verdes públicos por habitantes.

Por último, tomando como base el documento Certificación del urbanismo ecológico de la Agencia de Ecología urbana de Barcelona (2012) se determinó el índice de accesibilidad a pie a los espacios verdes públicos. Para ello, se generó para cada una de las categorías definidas en la instancia anterior un buffer con la máxima distancia recomendada para el acceso a pie:

- Hasta 34.999 m<sup>2</sup>e: 300 m.
- Entre 35.000 a 99.999 m<sup>2</sup>: 500 m.
- Más de 100.000 m<sup>2</sup>: 900 m.

Luego, mediante una operación de superposición se determinó la proporción de ocupación de cada zona buffer sobre cada radio censal -unidades de distribución de la población- determinando así de manera indirecta la proporción de acceso de la población a los espacios verdes públicos.

### III. RESULTADOS

#### A) DISPONIBILIDAD Y DISTRIBUCIÓN DE ESPACIOS VERDES PÚBLICOS

En lo que corresponde a la disponibilidad de espacios verdes públicos en la ciudad de Río Cuarto por categoría de tamaño (tabla I) se observa, por un lado, un área urbana consolidada que cuenta con un total de 247 espacios públicos verdes que comprenden 4.477.482 m<sup>2</sup> y representa el 7,45% de la superficie total del área, cuya disponibilidad de espacios verdes por habitante es de 28,50 m<sup>2</sup>. Este último valor excede favorablemente los parámetros fijados por la OMS de entre 10 y 15 m<sup>2</sup> por habitante.

En cuanto a la participación porcentual de cada categoría en el total (figura 4), la categoría de más de 100.000 m<sup>2</sup> representa el 62,30 % (2.789.515 ha) de la superficie total de espacios verdes públicos, constituido por tan solo cuatro espacios verdes de importante dimensión tales como el Parque Sarmiento, Lago Villa Dálcar, ribera del río Cuarto y el Paseo Parque Evita del Andino.

TABLA I

DISPONIBILIDAD DE ESPACIOS VERDES PÚBLICOS EN LA CIUDAD DE RÍO CUARTO

ÁREA DE ESTUDIO	CATEGORÍAS	CANTIDAD	SUPERFICIE TOTAL (M <sup>2</sup> )	PARTICIPACIÓN PORCENTUAL DE CADA CATEGORÍA EN EL TOTAL	PARTICIPACIÓN DEL TOTAL EN LA SUPERFICIE TOTAL DEL ÁREA	DISPONIBILIDAD DE EVP/HAB
Área urbano consolidada	0-34.999 m <sup>2</sup>	238	1.278.387	28,50	7,45%	28,52 m <sup>2</sup> /ha
	35.999-99.999 m <sup>2</sup>	5	409.580	9,15		
	Más de 100.000 m <sup>2</sup>	4	2.789.515	62,30		
	Total	247	4.477.482	100		
Área de transición urbano-rural	0-34.999 m <sup>2</sup>	1	1021	100	0%	3,72 m <sup>2</sup> /ha
	35.999-99.999 m <sup>2</sup>	0	0	0		
	Más de 100.000 m <sup>2</sup>	0	0	0		
	Total	1	1021,48	100		

Fuente: elaboración propia con base a datos proporcionados por SIG del municipio de la ciudad de Río Cuarto.

En relación, a la categoría de hasta 34.999 m<sup>2</sup> se aprecia que si bien supera en cantidad con 238 espacios verdes públicos, sólo tienen una participación del 28,50 % (1.278.387 ha) que incluyen plazas, plazoletas, jardines boulevares y paseos. Por último, la categoría de entre 35.999 m<sup>2</sup> y 99.999 m<sup>2</sup>, representa tan solo el 9,15 (409.580 ha) del total que comprenden solamente 5 espacios verdes públicos, constituidos por plazas.

Comparando dicho cuadro de situación en el área urbana consolidada con relación al área de transición urbano-rural, se encontraron fuertes contrastes. Esta última área cuenta con tan sólo un espacio verde público que no supera los 34.999 m<sup>2</sup> que en su totalidad cubren 1021 m<sup>2</sup> constituido por parte de la ribera del río Cuarto, con un nulo porcentaje de participación

en el total de la superficie total. Por su parte, la disponibilidad de espacios verdes públicos por habitante se encuentra muy por debajo de los valores mínimos establecidos por la OMS con el 3,72 m<sup>2</sup>/ha.

En este sentido, la disponibilidad de espacios verdes públicos en la ciudad de Río Cuarto demuestra un marcado déficit en el área de transición urbano-rural, lo que indicaría que dicho proceso de crecimiento urbano no ha estado acompañado por la creación de espacios verdes públicos que aseguren el bienestar de la población en estas áreas de reciente expansión.

**B) ACCESIBILIDAD A LOS ESPACIOS VERDES PÚBLICOS**

En relación al índice de accesibilidad de la población a los espacios verdes según su tamaño (figura 4) se detecta en lo que corresponde al área urbana consolidada, en primer lugar, la presencia de espacios verdes menores a 34.999 m<sup>2</sup> tales como plazas, plazoletas y boulevares, los mismos se concentran en el centro de la ciudad garantizándole a la población que reside en este sector el acceso a este tipo de espacios públicos. En lo que corresponde a los radios censales periféricos la disponibilidad de espacios verdes a menos de 300 m. disminuye lo que genera en estos espacios un bajo índice de accesibilidad.

En segundo lugar, en lo que corresponde a los espacios verdes entre 35.000 y 99.999 m<sup>2</sup> se observan en menor cantidad dis-

tribuidos por la ciudad, lo que contribuye a que un reducido porcentaje de la población ubicado en tres radios censales del sector centro, oeste y sur tengan acceso a dicha tipología.

Por último, en lo que corresponde a los espacios verdes mayor a 100.000 m<sup>2</sup>, el área urbana consolidada dispone del Parque Sarmiento, Parque Villa Dálcar, el Paseo Parque Evita en el Andino y ribera del río Cuarto, que actúan como cuatro importantes pulmones verdes dentro de la ciudad que garantiza a la población ubicada en los radios censales centrales el acceso a este tipo de espacios verdes.

En lo que concierne al área de transición urbano-rural el porcentaje de accesibilidad disminuye considerablemente, lo que demuestra valores altamente críticos en dichas áreas de recientes expansión.

A nivel general, se detecta en relación a un promedio entre los porcentajes de cobertura simultánea a las distintas tipologías de espacio verde considerados (figura 5), que la mayoría de la población tiene un bajo porcentaje de acceso a los espacios verdes públicos. De esta manera, se identifica que algunos radios censales urbanos centrales presentan valores más favorables con una alta proporción de población que tiene acceso a alguna zona verde, lo que contribuye en estos sectores a que tengan mayores beneficios del tipo ambiental, social y recreativo.

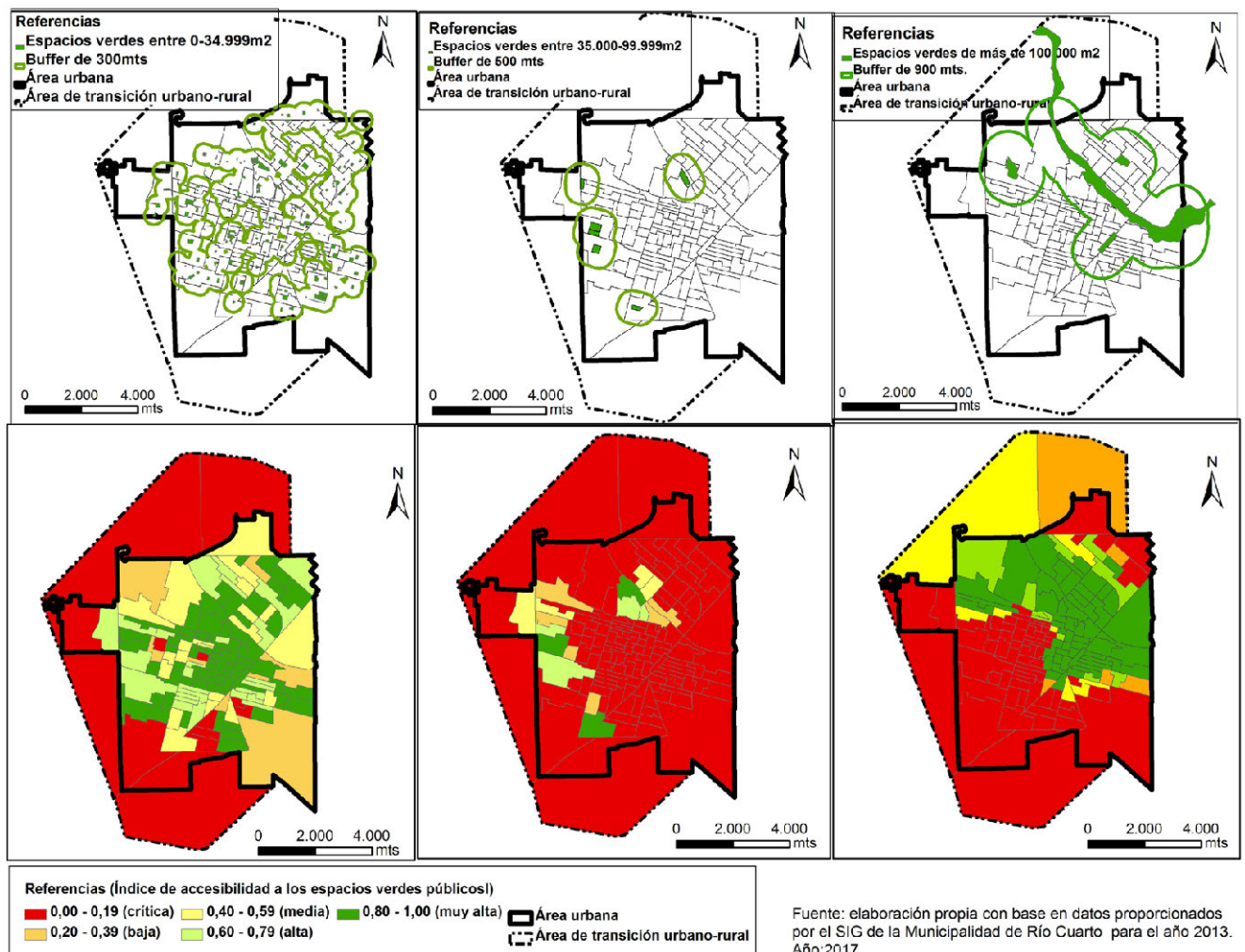
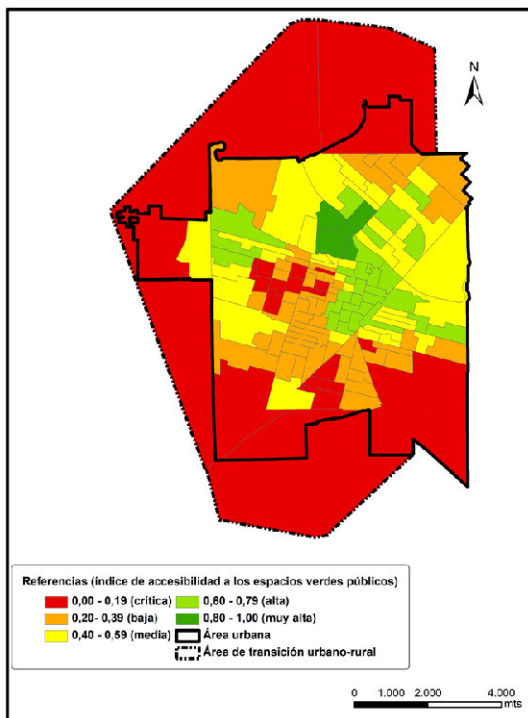


Figura 4. Distribución de los índices de accesibilidad a los espacios verdes públicos por categoría en la ciudad de Río Cuarto



Fuente: elaboración propia con base en datos proporcionados por el SIG de la Municipalidad de Río Cuarto para el año 2013.  
Año: 2017

Figura 5. Distribución promedio de los índices de accesibilidad a los espacios verdes públicos en la ciudad de Río Cuarto

#### IV. CONCLUSIONES

A partir del análisis de la disponibilidad y accesibilidad a los espacios verdes públicos en Río Cuarto se evidencian dos estados de situación bien contrastados. Por un lado, se detecta un área urbana consolidada que excede de manera considerable los umbrales mínimos establecidos por la OMS de superficie verde por habitante, a diferencia de un área de transición urbano-rural con un marcado déficit de espacios verdes públicos por habitante. Sin embargo, en ambas áreas se evidencia una desigual distribución de dichos espacios en términos de accesibilidad de la población a los mismos, cuadro de situación que se torna más crítico en el área de transición urbana rural. De esta manera, los resultados demuestran que la actual dinámica de crecimiento urbano difuso carece de una planificación y gestión urbana en relación a este bien público (Falcón, 2007; Guerrero et al, 2007; Gómez Lopera, 2005; Rendón Gutiérrez, 2010; Sorensen et al, 1998).

Por consiguiente se requiere de una planificación urbana integral, empezando por definir qué áreas periurbanas se incorporan al sector urbano consolidado para ocupar adecuadamente el territorio y de esta forma diseñar y construir espacios verdes públicos que garantice tanto el bienestar social como ambiental.

#### REFERENCIAS

- Falcón, A. (2007) .Espacios Verdes para una ciudad sostenible: Planificación, proyecto, mantenimiento y gestión. Barcelona, España. Editorial: Gustavo Gili, SL.
- Galfioni, M. A.; Degioanni, A.; Maldonado, G. Y Campanella, O. (2013) .Conflictos socio ambientales: identificación y representación espacial en ambiente SIG. Estudio de caso en la ciudad de Río Cuarto (Argentina). Estudios Geográficos, Vol. LXXIV (Nº 275), 469-493.
- Galfioni, M. A. y Degioanni, A (2015) Nuevas formas y contenidos: patrones de crecimiento urbano en la ciudad de Río Cuarto. Un abordaje desde sus variables demográficas y morfológicas. Reflexiones Geográficas (17), 50-64. Editorial: Agrupación de Docentes Interuniversitarios de Geografía. Río Cuarto, Argentina.
- Guerrero, M. y Culós, G.; 2007. Indicadores ambientales en la gestión de espacios verdes. El parque Cerro La Movediza. Tandil, Argentina. Revista Espacios, 28. (1), 57-73.
- Gómez Lopera, F. (2005). Las zonas verdes como factor de calidad de vida en las ciudades. Ciudad y Territorio. Estudios Territoriales, XXXVII (144) ,417-436. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2074702>
- Maldonado, G. I. Y Campanella, O. (2004) Evolución de la Mancha Urbana de la ciudad de Río Cuarto, Córdoba, Argentina, mediante la aplicación de Tecnología de Sensoramiento Remoto y Sistemas de Información Geográfica. 6º Encuentro Internacional Humboldt. Villa Carlos Paz, Córdoba.
- Rendón Gutiérrez, R. E. (2010). Espacios verdes públicos y calidad de vida. In 6to. Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual, Mexicali, 5, 6 y 7 Octubre 2010. Centre de Política de Sòl i Valoracions.
- Reyes Pácke, S., & Figueroa Aldunce, I. M. (2010). Distribución, superficie y accesibilidad de las áreas verdes en Santiago de Chile. EURE (Santiago), 36(109), 89-110.
- Rueda, S. (2012) Certificación del Urbanismo ecológico. Agencia de Ecología urbana, Barcelona, España.
- Sorensen, M., Berzatti, V., Kerpi, K. & Williams, J. (1998). Manejo de las Áreas Verdes Urbanas. Washington: Banco Interamericano de Desarrollo. Departamento de Desarrollo Sostenible N° ENV-109.
- Tella, G. y Potocko, A. (2009). Los espacios verdes públicos. Una delicada articulación entre demanda y posibilidades efectivas. Revista Mercado y Empresas para Servicios Públicos, (55), 40-55. <http://www.guillermotella.com/articulos/los-espacios-verdes-publicos-una-delicada-articulacion/>.

# Identificación de áreas con potencial conflicto entre usos del suelo en la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina)

Principi Noelia<sup>1</sup>, Buzai Gustavo<sup>1, 2</sup>

1 Instituto de Investigaciones Geográficas (INIGEO), Universidad Nacional de Luján  
Ruta Nacional N° 5 y Av. Constitución, (6700), Luján, Argentina.

2 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
prodisig@unlu.edu.ar / www.prodisig.unlu.edu.ar

## RESUMEN

El presente trabajo encuentra sus fundamentos a partir de las problemáticas desencadenadas por la dinámica del crecimiento urbano en la cuenca del río Luján, un espacio regional de 3.778 km<sup>2</sup>. El objetivo es determinar zonas de potencial conflicto ante la evolución espacial de los usos del suelo urbano-rural-conservación en la cuenca.

Para lograrlo se han realizado bases de datos en Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la aplicación de métodos de análisis espacial basados en las técnicas del modelado cartográfico, principalmente la evaluación multicriterio y el método LUCIS (Land Use Conflict Identification Strategy). El resultado final muestra que 1.577,94 km<sup>2</sup> presentan potencialidad de conflictos entre usos del suelo, lo que abarca un 41,76% del área de estudio.

La presentación incluye el marco metodológico de la investigación hacia la presentación de mapas parciales (aptitud urbana, aptitud rural y aptitud para la conservación) y el mapa final de potenciales conflictos.

Los resultados constituyen una importante herramienta transferida desde el ámbito académico hacia el ámbito de la gestión con la finalidad de apoyar los procesos de toma de decisiones. En este sentido se discute el rol de la Geografía Aplicada como campo científico productor de conocimientos de gran aptitud para las tareas del diagnóstico y propuestas en el marco del Ordenamiento Territorial.

Palabras clave: **Geografía Aplicada, Análisis Regional, SIG, Evaluación Multicriterio, LUCIS.**

## ABSTRACT

*The present paper is based on the problems triggered by the dynamics of urban growth in the Luján river basin, a regional area of 3,778 km<sup>2</sup>. Areas of potential conflict will be identified in relation to the spatial evolution of urban-rural-conservation land uses in the basin.*

*To achieve this, geographic information systems (GIS) databases have been developed for the application of spatial analysis methods based on cartographic modeling techniques, mainly multicriteria evaluation and Land Use Conflict Identification Strategy (LUCIS). The final result shows that 1,577.94 km<sup>2</sup> have potential for conflicts between land uses, which covers 41.76% of the study area.*

*The presentation includes the theoretical framework of the research and its methodological development towards the presentation of partial maps (urban aptitude, rural aptitude and conservation aptitude) and the final map of potential conflicts.*

*The results constitute an important tool transferred from the academic scope to the scope of the management with the purpose of supporting the processes of decision making. In this sense, the role of Applied Geography as a scientific field producing knowledge of great aptitude for the tasks of diagnosis and proposals within the framework of Territorial Planning is discussed.*

**Keywords:** *Applied Geography, Regional Analysis, GIS, Multicriterial Evaluation, LUCIS.*

## I. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se enmarca en el proyecto de investigación denominado “Análisis espacial y evaluación de zona de potenciales conflictos ambientales, productivos y patrimoniales ante la expansión urbana en la cuenca del río Luján (Provincia de Buenos Aires, Argentina)”<sup>1</sup>, que se realiza en la Universidad Nacional de Luján (UNLu) con apoyo financiero de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCyT).

La aplicación que se presenta tiene como objetivo obtener mapas de aptitud para el desarrollo o expansión agrícola, urbana y de conservación y a partir de ellos poder determinar la distribución espacial de las áreas con potencialidad de conflicto entre diferentes usos del suelo en la cuenca del río Luján.

La determinación de la competencia espacial y la identificación de escenarios de potencial conflicto entre diferentes usos del suelo permiten dar cuenta de la dinámica urbano-regional de esta área de la Provincia de Buenos Aires. A partir de técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC) con SIG se puede analizar el espacio geográfico con fines de apoyo a su planificación, ya que es posible investigar un número de alternativas entre múltiples criterios y objetivos. Conocer y analizar las áreas que presentarían conflictos a futuro, permitirá movilizar mecanismos de toma de conciencia, gestión, decisión y planificación a partir de estrategias que prioricen el ordenamiento territorial, basadas en herramientas de apoyo para la decisión espacial, en el marco de una Geografía Aplicada.

## II. ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del río Luján (figura 1) se ubica en el noreste de provincia de Buenos Aires, se extiende en sentido suroeste a noreste, ocupando una superficie de 3761 km<sup>2</sup>. Es la cuenca más extensa del Área Metropolitana de Buenos Aires. Al norte la cuenca limita con las cuencas del arroyo de la Cruz y del río Areco; al oeste y al sur con la cuenca del río Salado y al sureste con la cuenca del río Reconquista.

La delimitación de la cuenca del río Luján fue actualizada por Lanzelotti y Buzai (2015), a partir de un ajuste en los límites de la misma realizada con la utilización de imágenes satelitales SRTM y ASTERDEM7 y procesadas con el complemento ArcHydro de ARCGIS 10.1 y corregidas mediante interpretación visual de imágenes.

La cuenca alta se caracteriza por presentar zonas principalmente rurales, llegando a la cuenca baja que se encuentra en unas de las regiones urbanas de mayor importancia a nivel mundial, la Ciudad de Buenos Aires y el Gran Buenos Aires.

Los partidos bonaerenses que integran la cuenca son Campana, Escobar, Exaltación de la Cruz, General Rodríguez, José C. Paz, Luján, Malvinas Argentinas, Mercedes, Moreno, Pilar, San Andrés de Giles, Carmen de Areco, Chacabuco, San Fernando, Suipacha y Tigre.

La topografía general de la cuenca es suave, las máximas alturas se localizan en el oeste, llegando aproximadamente a los 60 msnm y descendiendo en sentido sureste hasta alcanzar el nivel del mar. Los rasgos singulares del río Luján son propios de los de zonas de escasa o nula pendiente. Las cotas fluctúan entre los 46 y 58 m con una media del tramo superior que ronda los 47 m (Paso Viola, 2016).

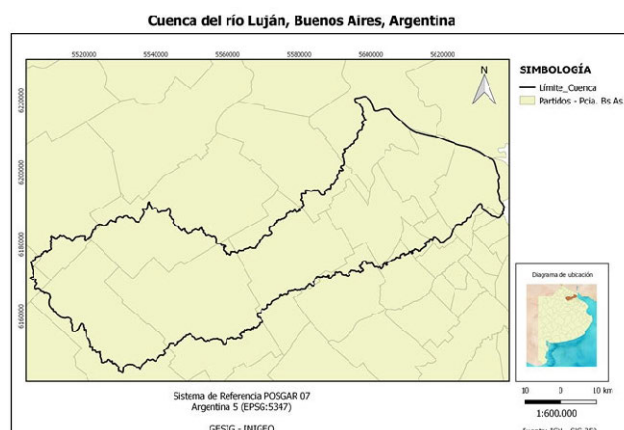


Figura 1. Área de estudio

## III. EVALUACIÓN MULTICRITERIO

La EMC consiste en un conjunto de técnicas que están orientadas a facilitar el proceso de toma de decisiones. Se evalúan diferentes alternativas a través de múltiples criterios en función de un objetivo específico o varios objetivos. El objetivo dentro de la EMC se entiende como el tipo de regla de decisión a utilizar, en cambio los criterios son el punto de referencia para la decisión a ser tomada, en este sentido es muy importante que los criterios puedan ser medidos y evaluados.

El análisis de EMC comienza con una información básica compuesta por variables o capas temáticas en formato cartográfico que sirven como criterios para realizar los procedimientos de evaluación. Hay dos tipos de criterios: factores o limitantes. Aquellos que presentan valores continuos de aptitud locacional en cada variable son llamados factores. El criterio de tipo limitante, también denominado restricción, actúa con la finalidad de asignar resultados en un sector de-

<sup>1</sup> Proyecto PICT 2014-1388. Director: Gustavo D. Buzai, Co-directora: Sonia L. Lanzelotti, Investigadores Luis Humacata, Noelia Principi, Gabriel Acuña Suárez y Claudia A. Baxendale. Vigencia 2016-2018

limitado del área de estudio con fin restrictivo. Mientras las primeras realzan la posibilidad de algunas posibilidades, los segundos restringen la disponibilidad de algunas alternativas en función de lo que se está evaluando.

Mediante la selección de variables, sus tratamientos tendientes hacia la generación de factores y restricciones, y la determinación de diferentes formas de combinación nos encaminamos hacia la búsqueda de resultados. Las formas de vinculación se denominan reglas de decisión y su proceso de aplicación evaluación.

Estas relaciones pueden visualizarse en triángulo de decisiones estratégicas (Figura 2) formado por un espacio de relaciones en el interior de dos ejes ortogonales. En el eje x se presenta el nivel de riesgo y en el eje y el nivel de compensación. Las soluciones posibles están entre los métodos booleanos por multiplicación, con análisis de riesgo mínimo sin compensación, a través de la suma donde se presenta un escalonamiento hacia el riesgo máximo sin compensación, y, por última, la combinación lineal ponderada donde se presenta un análisis de riesgo medio con máxima compensación (Buzai y Baxendale, 2011).

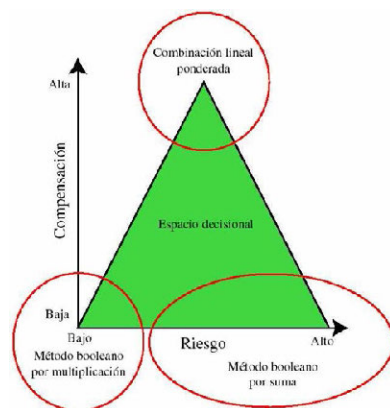


Figura 2. Triángulo de decisiones locales estratégicas

La regla de decisión, entonces, debe permitirnos integrar de manera coherente los diferentes criterios implicados en la evaluación, ya que es el procedimiento por el que se obtiene una evaluación particular y nos sirve para comparar, a través de ella, diferentes tipos de evaluaciones. Una vez que la regla de decisión está estructurada, el paso siguiente que es la aplicación es lo que se denomina evaluación y será lo que finalmente generará el modelo de decisión. Una regla de decisión, por ejemplo, puede ser tan simple como aplicar un buffer de distancia para la localización de alguna actividad específica. Cuando comenzamos a integrar diferentes criterios de manera coherente en la regla de decisión, esta se va complejizando y aquí la EMC es donde cobra su mayor importancia.

#### IV. LAND USE CONFLICT IDENTIFICATION STRATEGY (LUCIS)

El modelo LUCIS fue desarrollado Carr y Zwick (2006, 2007), quienes tomando como base la lógica de las técnicas de evaluación multicriterio apoyadas por el uso de SIG, han propuesto un modelo de resolución estandarizada de interesantes capacidades para la identificación empírica de áreas potenciales de conflicto entre usos del suelo.

El modelo contempla la realización de seis pasos como camino de resolución hacia la obtención de un mapa con las áreas de potenciales conflictos entre usos del suelo urbano, agrícola y de conservación:

1. Definición de objetivos: Se considera que cada localización puede tener tres posibilidades de ocupación en cuanto a usos del suelo, los cuales pueden estar dedicados a actividades urbanas, agrícolas o de conservación. Cada una de estas actividades tiene como meta la maximización de oportunidades en ciertas líneas de desarrollo, por ejemplo, el uso urbano en cuanto a la expansión residencial y actividades de la producción secundaria y terciaria, el uso agrícola para la expansión de la producción primaria, principalmente la agricultura y el uso de conservación para la protección ecológica.
2. Creación de la base de datos espacial: Se realiza generando una serie de capas temáticas con información relevante y básica para el logro de cada uno de los tres objetivos señalados. Además de los temas a ser considerados en el análisis, en este punto se deben definir los aspectos técnicos de la creación de bases de datos alfanuméricas y gráficas en el marco de la tecnología SIG, como la extensión del área de estudio, sistema de proyección y unidad mínima de resolución espacial.
3. Análisis de aptitud: Se realiza el análisis de cada capa temática del área de estudio determinando la aptitud relativa de las categorías de cada criterio para cada objetivo. Corresponde a la creación de factores para la aplicación de las técnicas de evaluación multicriterio. El método LUCIS considera una estandarización de aptitud continua (ac).
4. Determinación de preferencias: Se establece la importancia de cada factor en la resolución del objetivo específico. Para lograr el resultado se apela al conocimiento teórico o se utiliza una metodología para la obtención de los números representativos de la importancia de cada factor, como el método de ponderación por ranking recíproco (Malczewski, 1999). El procedimiento de asignación de importancias puede estar apoyado por la colaboración entre expertos en cada temática involucrada (Jankowski y Nyerges, 2001) y matemáticamente cumple las siguientes características:

$$\sum p_i = 1 \quad [1]$$

$$0 < p_i \leq 1 \quad [2]$$

5. Aplicación de la regla de decisión y reclasificación de resultados: Se ejecuta el procedimiento de combinación lineal ponderada obteniéndose un valor índice sintético para cada localización en base a la definición de factores y los valores de ponderación para cada uno de ellos de la siguiente forma:

$$I_i = \sum p_i x_i \quad [3]$$

o integrando restricciones espaciales incorporando la multiplicatoria de capas booleanas

$$I_i = \sum p_i x_i \prod r_j \quad [4]$$

El resultado corresponde a tres mapas de aptitud general para usos de urbano, agrícola o de conservación. Una reclasificación lleva cada valor de aptitud continua (ac) a tres categorías de la siguiente forma:

$$1 \leq ac \leq 3 \quad [5]$$

El resultado corresponde a tres mapas de aptitud reclasificada para cada objetivo en aptitudes altas (A), media (M) y baja (B).

6. Identificación de áreas potenciales de conflicto: La combinación de usos conflictivos y no-conflictivos se encuentra en la combinatoria de las tres categorías para cada objetivo a partir de un gráfico de dispersión tridimensional que presenta las 27 combinaciones posibles de los tres mapas de aptitud considerados el Objetivo 1, Objetivo 2 y Objetivo 3 (figura 3). Los espacios que generan conflicto en la asignación de usos son los siguientes: BBB, MBM, ABA, MMB, BMM, MMM, AMA, AAB, AAM, BAA, MAA y AAA destacados en color más oscuro.

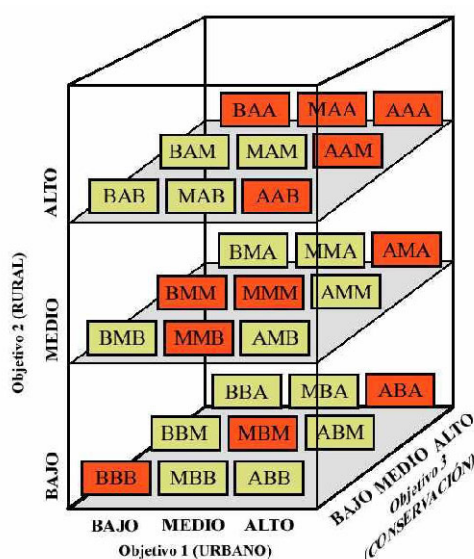


Figura 3. Combinación de objetivos y determinación de situaciones de potencial conflicto entre usos del suelo

## V. APLICACIÓN Y RESULTADOS

### DEFINICIONES PRELIMINARES Y ANÁLISIS DE APTITUD

Las definiciones preliminares consistieron en evaluar diferentes capas temáticas que podrían ser incluidas en el análisis de EMC considerando el objetivo: aptitud urbana. Se consideraron las variables del proyecto SIG-250 del Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina (IGN) y se consideraron aquellas que contenían información relevante para el logro de los objetivos. Todas las variables, en formato shapefiles debieron ser convertidas al formato vectorial nativo del software IDRISI Selva 17.0, con el que se realizó la aplicación metodológica, y luego convertidas a formato raster para poder aplicar la EMC, en un módulo específico que el programa tiene para esta metodología. En este punto la intervención del investigador es importante al definir qué variables se incluyen dentro de las posibilidades existentes, considerando la significancia que posean para lograr el objetivo: expansión o desarrollo del uso del suelo urbano, agrícola o de conservación.

### CRITERIOS PARA LA OBTENCIÓN DE LOS MAPAS DE APTITUD

Con las variables seleccionadas se procede a la creación de los criterios o factores para luego aplicar las técnicas de EMC. En este punto se debe determinar la importancia de cada criterio en la resolución de cada objetivo específico. Para lograr este resultado se considera el conocimiento teórico de la problemática, los reglamentaciones que pudieran apoyar las determinaciones o las consultas a expertos en diferentes temáticas.

Se obtienen factores con valores que oscilan entre 0-255, ya que se someten a una estandarización difusa que permite obtener mapas de aptitud continua para cada criterio, oscilando entre los extremos apto-no apto. Luego, a partir de una combinación basada en un método de EMC se llega al mapa de aptitud que contemplará tres categorías de aptitud, que se obtendrán a partir del procedimiento de reclasificación: baja (entre 0 y 85), media (entre 85 y 170) y alta (entre 170 y 255).

Es importante aclarar que todos los mapas son multiplicados por el mapa de áreas urbanas actuales booleano, como restricción, que deja en valor 0 las áreas que actualmente son de uso urbano y con valor 1 el resto. Esto se realiza para no considerar en el análisis las áreas que ya están consolidadas como urbanas y que por sus características físicas podrían ser aptas para algún otro uso.

### HACIA LA OBTENCIÓN DEL MAPA DE APTITUD URBANA

La aptitud urbana se calculó a partir de 5 capas temáticas, en las cuales fueron aplicados los siguientes procedimientos para la creación de factores:

- (1) Áreas urbanas. Consideración de áreas urbanas actuales y cálculo de distancias, aplicación de cálculo fuzzy lineal decreciente (255-0 en distancias de 0 a 2000 metros).
- (2) Red vial. Consideración de red vial (incluye rutas nacionales y provinciales, caminos pavimentados y de tierra) y cálculo de distancias, aplicación de cálculo fuzzy lineal decreciente (255-0 en distancias de 0 a 3000 metros).
- (3) Estaciones de ferrocarril. Consideración de las estaciones de ferrocarril y cálculo de distancias, aplicación de cálculo fuzzy lineal decreciente (255-0 en distancias de 0 a 2000 metros).
- (4) Bañados: terrenos bajos y húmedos, a trechos cenagosos y a veces inundado por aguas pluviales o por las de un río o laguna cercana. Consideración de los bañados como 0, aplicación de cálculo fuzzy lineal decreciente (255-0 en distancias 0 a 10000 metros de los bañados).
- (5) Cursos de agua. Consideración de los cursos de agua, cálculo de un buffer de distancia de 1000 metros y luego cálculo de distancias, aplicación de cálculo fuzzy lineal decreciente (255-0 en distancias de 0 a 2000 metros considerando el buffer).

El método de ponderación por ranking recíproco consideró el siguiente orden en la importancia de los factores: áreas urbanas (1), red vial (2), cursos de agua (3), bañados (3) y estaciones de ferrocarril (4), dando como resultado las ponderaciones 0,41; 0,21; 0,14; 0,14 y 0,10 respectivamente.

El mapa de aptitud urbana (figura 4) presenta una reclasificación del resultado en tres categorías, base para la combinación posterior, correspondiente al objetivo 1 que ocupa el eje x en la figura 3.

### HACIA LA OBTENCIÓN DEL MAPA DE APTITUD AGRÍCOLA

La aptitud agrícola se calculó a partir de la utilización de 3 capas temáticas, en las cuales fueron aplicados los siguientes procedimientos para la creación de factores:

- (1) Relieve (Categorías: 0-10m, 10-20m, 20 -30m, 30-40m, 40-50m y 50-60m). Aplicación de cálculo fuzzy lineal decreciente (255-0 la cobertura de mayor aptitud en la categoría de mayor altura)
- (2) Suelos (Categorías: uso de tierra mixto; plantaciones perennes; bosque artificial; cañadas; bañados; ciénaga, tremedal, tembladeral; paleocauce o cauce abandonado; cordones o



acumulación de conchillas y planta urbana). Reclasificación en el siguiente orden: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 respectivamente. Aplicación de cálculo fuzzy lineal decreciente (255-0 la cobertura de mayor aptitud en la primera categoría)

- (3) Infraestructura rural. Consideración de la infraestructura rural existente y cálculo de distancias, aplicación de cálculo fuzzy lineal decreciente (255-0 en distancias de 0 a 4000 metros).

El método de ponderación por ranking recíproco consideró el siguiente orden en la importancia de los factores: Relieve (1), Suelos (1), Infraestructura rural (3), dando como resultado los valores 0,43; 0,43 y 0,14 respectivamente.

El mapa de aptitud urbana (figura 5) presenta una reclasificación del resultado en tres categorías, base para la combinación posterior, correspondiente al objetivo 2 que ocupa el eje y en la figura 3.

HACIA LA OBTENCIÓN DEL MAPA DE APTITUD PARA LA CONSERVACIÓN

La aptitud para la conservación ha sido calculada a partir de la utilización de 3 capas temáticas, a partir de la aplicación de los siguientes procedimientos para la creación de factores:

- (1) Suelos. (Categorías: bañados; cañadas; paleocauce o cauce abandonado; ciénaga, tremedal, tembladeral; cordones o acumulación de conchillas; bosque artificial; plantaciones perennes, uso de tierra mixto y planta urbana). Reclasificación en el siguiente orden: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 y 9 respectivamente. Aplicación de cálculo fuzzy lineal decreciente (255-0 la cobertura más óptima la primera
- (2) Cursos de agua. Consideración de los cursos de agua y cálculo de distancias, aplicación de cálculo fuzzy lineal decreciente (255-0 en distancias de 0 a 1000 metros).

*Criterio: Distancia a cursos de agua*

- (3) Cuerpos de agua. Consideración de los cuerpos de agua y cálculo de distancias, aplicación de cálculo fuzzy lineal decreciente (255-0 en distancias de 0 a 1000 metros).

El método de ponderación por ranking recíproco consideró el siguiente orden en la importancia de los factores: Suelos (1), Cursos de agua (2) Cuerpos (2), dando como resultado los valores 0,50; 0,25 y 0,25 respectivamente.

El mapa de aptitud para la conservación (figura 6) presenta una reclasificación del resultado en tres categorías, base para la combinación posterior, correspondiente al objetivo 3 que ocupa el eje z en la figura 3.

IDENTIFICACIÓN DE ÁREAS CON POTENCIALES CONFLICTOS ENTRE USOS DEL SUELO

Para continuar con la aplicación del método LUCIS se realizó una nueva reclasificación de los mapas, ya que se necesitan los mapas es unidades, decenas y centenas para obtener todas las posibles combinaciones de zonas con o sin conflictos. Por ejemplo una combinación "333", sería una combinación altamente conflictiva, ya que sería de alta aptitud para los tres objetivos.

Con los mapas reclasificados se realiza la suma de los mismos y se obtiene un mapa con todas las combinaciones posibles entre los diferentes usos del suelo, conflictivas o no. Este mapa es el que permite obtener, a partir de la reclasificación y extracción de combinaciones conflictivas, el mapa final de potenciales conflictos agrupados (figura 7).

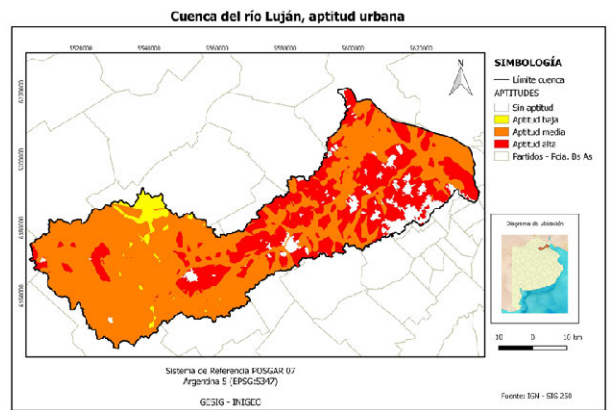


Figura 4. Mapa de aptitud urbana.

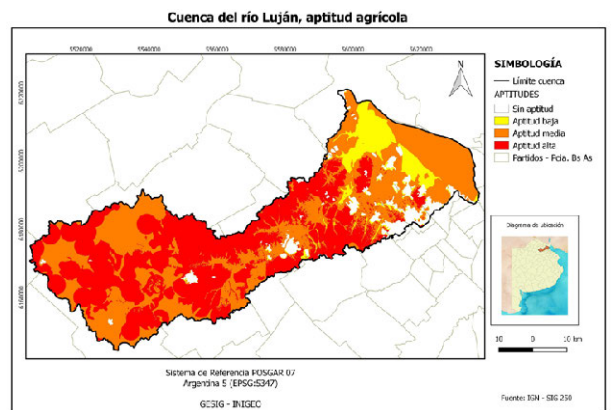


Figura 5. Mapa de aptitud agrícola

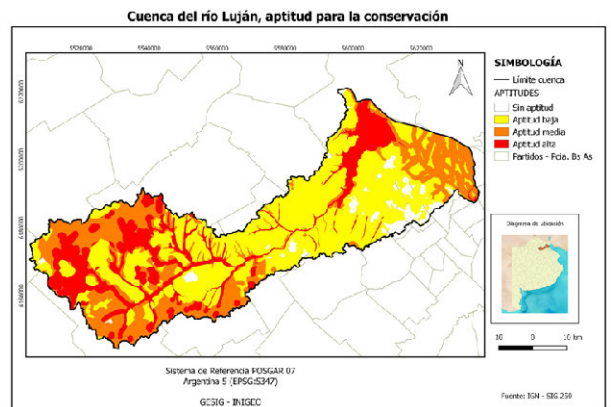


Figura 6. Mapa de aptitud para la conservación

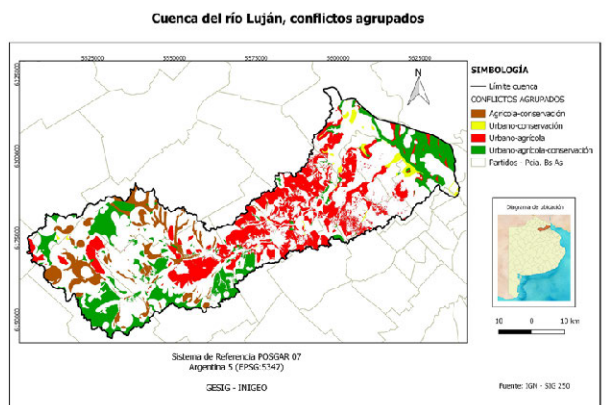


Figura 7. Mapa de conflictos entre usos del suelo agrupados

A partir del mapa de combinación de objetivos se pueden obtener de manera detallada las áreas de cada zona conflictiva en kilómetros cuadrados. A continuación se presentan los datos de conflictos desagregados y luego los conflictos agrupados.

**TABLA I**  
RESULTADOS DESAGREGADOS DE ÁREAS CON POTENCIAL CONFLICTO ENTRE USOS DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO LUJÁN

COMBINACIÓN	APTITUDES DOMINANTES	SUPERFICIE (KM <sup>2</sup> )
111	Urbano-Agrícola-Conservación	No se produce
122	Agrícola-Conservación	35,02
133	Agrícola-Conservación	13,67
212	Urbano- Conservación	27,92
221	Urbano-Agrícola	188,43
222	Urbano-Agrícola-Conservación	562,05
233	Urbano- Conservación	203,57
313	Urbano- Conservación	13,33
323	Urbano- Conservación	8,37
331	Urbano-Agrícola	516,19
332	Urbano-Agrícola	7,41
333	Urbano-Agrícola-Conservación	1,98
<b>TOTAL</b>	Conflictos completos	1577,94

**TABLA II**  
RESULTADOS AGRUPADOS DE ÁREAS CON POTENCIAL CONFLICTO ENTRE USOS DEL SUELO EN LA CUENCA DEL RÍO LUJÁN

COMBINACIÓN	APTITUDES DOMINANTES	SUPERFICIE (KM <sup>2</sup> )
122-233-233	Agrícola-Conservación	252,26
212-313-323	Urbano-Conservación	49,62
221-331-332	Urbano-Agrícola	712,03
222-333	Urbano-Agrícola- Conservación	564,03
<b>TOTAL</b>	Conflictos completos	1577,94

## VI. CONCLUSIONES

El mapa de aptitud urbana (figura 4), se observa que la mayor aptitud de expansión del uso urbano se localiza en las zonas cercanas al uso urbano actual, esto está vinculado a que en la definición de criterios y aplicación de la regla de decisión el criterio de uso urbano actual tuvo la mayor ponderación, con un peso de 0.41. El mapa de aptitud agrícola (figura 5), se observa que las áreas más aptas son las que corresponden al uso mixto de la tierra (agrícola-ganadero), según la clasificación de las coberturas del suelo del IGN. Mientras que las zonas de bañados y de acumulación de conchillas presentan las aptitudes más bajas. En este caso, los criterios considerados dieron mayor ponderación a las coberturas del suelo y, dentro de estas, específicamente al área de uso mixto de la

tierra, además de considerar las alturas más propicias para el desarrollo agrícola. Finalmente, en el caso del mapa de aptitud para la conservación (figura 6) muestran mayor aptitud las áreas de bañados y los cursos y cuerpos de aguas y sus áreas cercanas, considerándose estas áreas como de mucha importancia para conservación de la biodiversidad.

Los resultados combinatorios de los mapas objetivos permitieron obtener el mapa final de conflictos entre usos del suelo (figura 7), con las tablas correspondientes donde aparece la superficie que presentaría conflicto según el tipo de uso del suelo. La combinación urbano-agrícola-conservación (111) es la única que no presenta superficie con conflicto. Sin embargo, existen 5 combinaciones más que presentan valores de conflictos muy bajos, que representan una superficie menor a 15 km<sup>2</sup>. Estas combinaciones son: 133, 313, 323, 332 y 333.

En la tabla II, con las áreas de conflictos agrupados, aparece la combinación urbano-agrícola como la de mayor área de conflicto entre estos usos del suelo en la cuenca del río Luján, con 712,03 km<sup>2</sup> afectados. Le sigue en importancia la combinación urbano-agrícola-conservación con 564,03 km<sup>2</sup> en posibilidad de conflicto futuro, finalmente la combinación agrícola-conservación con 252,26 km<sup>2</sup> con potencialidad de conflicto, y por último la combinación urbano-conservación con un valor de conflicto muy bajo, de 49,62 km<sup>2</sup>.

La superficie total de conflicto es de 1577,94 km<sup>2</sup>, sobre una superficie total de 3761 km<sup>2</sup>. Es decir, de la totalidad de superficie de la cuenca del río Luján, un 41,95 % se encuentra en potencial conflicto entre usos del suelo. De ese porcentaje en conflicto, el 80,85% lo concentran los conflictos urbano-agrícola y urbano-agrícola-conservación, con 45,12% y 37,73% respectivamente.

Los resultados obtenidos son considerados aceptables, responden a un resultado esperable para una región con una dinámica regional muy activa, con zonas de transición entre usos plenamente agrícolas y otras áreas urbanas, densamente pobladas, principalmente las zonas cercanas a la ciudad de Buenos Aires, y con la presencia de cursos y cuerpos de agua muy importantes en cuanto a la conservación de biodiversidad.

Finalmente, el trabajo permite evidenciar la potencialidad de la EMC para obtener resultados en el marco de una Geografía Aplicable con importantes posibilidades de avanzar hacia una Geografía Aplicada, que además puede ser transferible a organismos de gestión y planificación para utilizar los resultados obtenidos con la finalidad de mitigar los efectos socioespaciales negativos de la competencia por el territorio a futuro. Desde este punto de vista ha sido muy favorable poder lograr correctamente el desarrollo teórico-metodológico de la aplicación basada en SIG y obtener como resultado final un escenario futuro de conflictividad entre los tres usos del suelo considerados.

## REFERENCIAS

- Baxendale, C.A. 2007. Región y estudios regionales. Consideraciones desde los diferentes enfoques de la Geografía. *Frnteras*. 6(6):29-36.
- Bertalanffy, L.von 1968. *General System theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller. New York.
- Bunge, M. 2012. *A la caza de la realidad*. Gedisa. Barcelona.
- Bunge, M. 2014. *Memorias. Entre dos mundos*. EUDEBA. Buenos Aires.
- Burrough, P.A.; McDonnell, R.A. 1998. *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. Oxford.
- Buzai, G.D. (Dir.) 2002. *Altas digital de la cuenca del río Luján*. Universidad Nacional de Luján. Luján (versión CD).
- Buzai, G.D.; Baxendale, C.A. 2007. Áreas de potencial conflicto entre usos del suelo. Identificación mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (Primera parte: descripción metodológica). *Frnteras*. 6(6):45-49.
- Buzai, G.D.; Baxendale, C.A. 2008. Áreas de potencial conflicto entre usos del suelo. Identificación mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (Segunda parte: aplicación). *Frnteras*. 7(7):33-39.
- Buzai, G.D.; Baxendale, C.A. 2010. Método LUCIS – Land Use Conflict Identification Strategy. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica. (Bibliografía, Software y Metodología)*. 2(2):1-4.
- Buzai, G.D.; Baxendale, C.A. 2011. *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Tomo 1: Perspectiva científica – temáticas de base vectorial*. Lugar Editorial. Buenos Aires.
- Buzai, G.D.; Baxendale, C.A.; Cacace, G.; Dzendoletas, M.A. 2011. Análisis de usos del suelo urbano y regional. Localizaciones óptimas y conflictivas estudiadas con Sistemas de Información Geográfica. PROEG 11. Universidad Nacional de Luján. Luján.
- Buzai, G.D.; Cacace, G. 2016. El concepto de espacio. En: Buzai, G.D.; Baxendale, C.A.; Humacata, L.; Cacace, G.; Delfino, H.; Lanzelotti, S.; Principi, N. *Geografía y Análisis Espacial. Aplicaciones urbano-regionales con Sistemas de Información Geográfica*. EdUNLu. Luján. pp. 51-56.
- Buzai, G.D. & Principi, N. (2017) Identificación de áreas de potencial conflicto en la cuenca del río Luján (Argentina). *Revista Geográfica de América Central*. (en prensa)
- Carr, M.H.; Zwick, P.D. 2006. Using GIS suitability analysis to identify potential future land use conflicts in north central Florida. *Journal of Conservation Planning*. 1(1):89-105.
- Carr, M.H.; Zwick, P.D. 2007. *Smart Land-Use Analysis. The LUCIS Model*. ESRI Press. Redlands.
- DeMers, M. 2002. *GIS Modeling in Raster*. John Wiley. New York.
- García, R. *La Epistemología Genética y la ciencia contemporánea*. Gedisa. Barcelona.
- García, R. 2006. *Sistemas Complejos*. Gedisa. Barcelona.
- Gómez Delgado, M.; Barredo Cano, I. 2006. *Sistemas de Información Geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Alfaomega-Ra-Ma. México DF.
- Instituto Nacional del Agua. 2007. *Diagnóstico del funcionamiento hidrológico hidráulico de la cuenca del río Luján – provincia de Buenos Aires*. Ministerio del Interior, Obras Públicas y Vivienda. Ezeiza.
- GIS-Supported Collaborative Decision Making: Results of an Experiment. *Annals of the Association of American Geographers*. 91(1):48-70.
- Jiang, H.; Eastman, J.R. 2000. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation in GIS. *International Journal of Geographical Information Sciences*. 14(2):173-184.
- Lanzelotti, S.L.; Buzai, G.D. 2015. *Delimitación de la cuenca del río Luján, Provincia de Buenos Aires Argentina. Informe Técnico N° 1. PICT-2014\_1388. GESIG-PRODISIG, Universidad Nacional de Luján*. Luján.
- Malczewski, J. 1999. *GIS and multicriteria decision analysis*. John Wiley & Sons. New York.
- Pacione, M. 1999. *Applied Geography: Principles and Practice*. Routledge. London.
- Análisis cronológico documental de la evolución de la cartografía en la alta cuenca del río Luján bajo la óptica de los procesos histórico globales y locales. Diagnóstico cartográfico geonímico, toponímico y geoespacial del Partido de Suipacha como modelo casuístico. Tesis de Licenciatura en Geografía. Universidad Nacional de Luján. Luján.
- Paso-Viola, L.F. 2016. Origen del Río Luján en el área imbrífera localizada en los partidos de Chacabuco, Suipacha y Carmen de Areco y su representación cartográfica. *Red Sociales*. 3(1):17-30.
- Philipponneau, M. 2001. *Geografía Aplicada*. Ariel. Barcelona.
- Principi, N. 2013. *Análisis de la estructura espacial regional*. Editorial Académica Española. Saarbrücken.
- Principi, N. 2016. Evaluación multicriterio para la identificación de áreas con potenciales conflictos entre usos del suelo en la cuenca del río Luján (Buenos Aires, Argentina). Trabajo final de graduación. Maestría Profesional en Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. UCR-UNA. San José de Costa Rica.
- Principi, N.; Buzai, G.D. 2016. Análisis especial para la determinación de la estructura socioespacial del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires. En: Buzai, G.D.; Baxendale, C.A.; Humacata, L.; Cacace, G.; Delfino, H.; Lanzelotti, S.; Principi, N. *Geografía y Análisis Espacial. Aplicaciones urbano-regionales con Sistemas de Información Geográfica*. EdUNLu. Luján. pp. 197-204.
- Tomlin, C.D. 1990. *Geographic Information Systems and Cartographic Modeling*. Englewood Cliffs – Prentice Hall. New Jersey.
- UF (2014) *Land Use Conflict Identification Strategy (LUCIS)*. Technical Report. LUCIS Technical Report. Heartland 2060. University of Florida. Bartow.
- Wilson, J.P.; Burrough, P.A. 1999. Dynamic Modeling, Geostatistics, and Fuzzy Classification: New Sneakers for a New Geography? *Annals of the Association of American Geographers*. 89:736-746.
- Zwick, P.D.; Patten, I.E.; Arafat, A. 2016. *Advanced Land-Use Analysis for Georegional Design. Using LUCISplus*. ESRI Press. Redlands.



# Integración de múltiples datos y modelos para orientar la zonificación del suelo no urbanizable en Asturias (España)

Marquínez Jorge<sup>1</sup>, Colina Arturo, Álvarez Miguel Ángel, Fernandez-Iglesias Elena, García Manteca Pilar; Fernandez Menéndez Susana, García de la Fuente Laura, Fernández Prieto José Antonio, Menéndez Duarte Rosana, Recondo Carmen y Valderrábano Jesús.

<sup>1</sup> Instituto de Recursos Naturales y Ordenación del Territorio (INDUROT) / Universidad de Oviedo  
Mieres/Asturias/España  
marquinez@uniovi.es

## RESUMEN

Durante más de 30 años desde el INDUROT se han abordado numerosos trabajos, utilizando los Sistemas de Información Geográfica (SIG), para caracterizar los valores ambientales, la calidad de los suelos y los riesgos naturales en el territorio de Asturias, una región de 10.600 km<sup>2</sup> en el norte de España. En este trabajo se describen los procedimientos para la integración de diversos datos temáticos con el objetivo de generar información territorial útil para la zonificación de los usos del suelo en los instrumentos de planificación territorial y urbanística. A la información básica, elaborada por el propio INDUROT a escala 1:25.000, se ha sumado información procedente de imágenes de satélite, diferentes modelos digitales del terreno y otros datos socio-económicos y naturales de fuentes diversas. A partir de estos datos se realizó la zonificación del Suelo No Urbanizable, considerando el valor natural de los ecosistemas, la calidad del hábitat para alguna especie protegida utilizada como indicador, los usos actuales del suelo y la potencialidad edáfica. Se ha tenido en cuenta también la cartografía de los riesgos naturales (inundaciones, inestabilidad de laderas, aludes de nieve, erosión del suelo, etc.) y los derivados de los incendios forestales. La cartografía resultante se gestiona a través de un SIG y constituye una herramienta de gran utilidad para la Ordenación del Territorio y la gestión del medio natural, la explotación de los recursos y la reducción de los riesgos.

Palabras clave: **SIG, planes urbanísticos, usos del suelo, calidad del hábitat, riesgos naturales.**

## ABSTRACT

*For more than 30 years, INDUROT has developed numerous studies using Geographic Information Systems (GIS), to characterize the environmental values, soil quality and natural hazards in the territory of Asturias, a region of 10,600 km<sup>2</sup> in the north of Spain. This paper describes the procedures for the integration of several thematic data with the objective of generating useful territorial information for the zoning of land uses in territorial planning and urban planning instruments. To the basic information, elaborated by INDUROT at 1: 25.000 scale, information has been added from satellite images, different digital terrain models and other socio-economic and natural data from diverse sources. Based on these data, the zoning of the Non-Constructible Soil was made, considering the natural value of the ecosystems, the habitat quality for some protected species used as an indicator, current land uses and soil potential. Mapping of natural hazards (flooding,*

*slope instability, snow avalanches, soil erosion, etc.) and forest fire derivation have also been taken into account. The resulting cartography is managed through a GIS and is a very useful tool for Land Management and the management of the natural environment, exploitation of resources and reduction of risks.*

*Keywords: GIS, urban planning, land uses, habitat quality, natural hazards.*

## I. INTRODUCCIÓN

La ordenación del territorio es una disciplina científico-técnica que persigue el desarrollo regional equilibrado y la organización física del territorio desde una perspectiva multidisciplinar e integrada. Entre sus objetivos se encuentran la gestión responsable de los recursos naturales, la protección del medio ambiente y la utilización racional del territorio (CEMAT, 1983)

Pese a ello, hasta hace poco tiempo la práctica y la legislación urbanística han considerado el suelo como un mero recurso económico que posibilita la creación de una nueva ciudad mediante su transformación para acoger las edificaciones en las que se desarrollen actividades productivas o servicios a la sociedad.

Este concepto, que se podría aplicar prácticamente sin reservas al suelo urbanizado, presenta numerosas carencias para los espacios en los que el paisaje predominante no está dominado por la edificación y el resto de elementos de urbanización, aunque puedan aparecer de forma extensiva, es decir, aquellas zonas en las que las transformaciones provocadas por la actividad humana no han borrado sus valores o características originales.

El principal reto de la ordenación del territorio y del urbanismo contemporáneos es seguir contribuyendo al progreso de la sociedad considerando el suelo, además de un recurso económico, como uno de los más valiosos elementos naturales de los que disponemos, y para cuya regulación es preciso tener en cuenta toda una serie de factores diversos entre los que se encuentran los ecosistemas y paisajes rurales (Tojo y Naredo, 2010).

En la normativa urbanística española esta parte mayoritaria del territorio se encuentra en situación de "suelo rural" y está caracterizado por la presencia de valores ecológicos, agrícolas, ganaderos, forestales o paisajísticos o por la amenaza de riesgos naturales o tecnológicos (España, 2015). Como se puede ver, a pesar de la denominación, el concepto de suelo rural resulta mucho más complejo que el mero soporte a las actividades productivas primarias, abarcando también factores ambientales y ecológicos. En consecuencia, conforme a la legislación española, los instrumentos de ordenación territorial y urbanística deben establecer mecanismos de protección adecuados para preservar el suelo rural de su transformación mediante la urbanización (España, 2015).

Habitualmente, la regulación urbanística se ha apoyado en normas reguladoras de los usos y actividades elaboradas bajo modelos genéricos que, si bien consiguen un marco legislativo uniforme, pueden no responder adecuadamente a las particularidades de los territorios, llegando incluso a limitar su desarrollo. Quizás sea en el suelo rural donde se hacen más evidentes las deficiencias de la legislación, ya que a partir de ese modelo genérico se debe hacer frente a realidades espaciales muy diferentes. Pero, además, es en esta clase urbanística de suelo donde la normativa básica nacional ha sido menos específica al ser ésta la parte del territorio sometida a menores presiones económicas derivadas del proceso de urbanización o de la posibilidad de emprenderlo.

En España, las Comunidades Autónomas, en desarrollo de sus competencias, han intentado mitigar estas carencias desarrollando normativas de carácter subsidiario y complementario que permitieran una ordenación de lo que no es urbano ni urbanizable, con unos criterios adaptados al propio territorio y sus particularidades. El reto ha sido mucho mayor para aquellos territorios como los de la fachada cantábrica, en los que la actividad agrícola no es predominante y la complejidad de las características físicas y socioeconómicas del "medio rural" hace inviable un tratamiento simplificado como el que propone la legislación estatal.

En el caso del Principado de Asturias esta preocupación se ha reflejado en las primeras normativas regionales en materia de ordenación del territorio y urbanismo, como las Normas Urbanísticas Regionales en el Medio Rural de Asturias, redactadas en 1984, o la Ley 6/90, de 20 de diciembre, Sobre Edificación y Usos en el Medio Rural. En ambos casos se realizó un tratamiento normativo particularizado para Asturias del suelo rural, denominado suelo no urbanizable (SNU), desarrollando el marco general establecido por la legislación nacional.

La vigente legislación asturiana en la materia (Asturias, 2008) ha mantenido la misma línea estableciendo diversas categorías para la ordenación del suelo rústico o SNU:

- a) Suelo no urbanizable de especial protección, integrado por aquellos espacios cuyos excepcionales valores de cualquier género les hagan merecedores de un alto grado de protección.
- b) Suelo no urbanizable de interés, compuesto por aquellos terrenos que deban quedar preservados del desarrollo urbanístico y sometidos a un régimen específico de protección en consideración a sus valores paisajísticos, históricos, arqueológicos, científicos, ambientales o culturales, por la existencia de riesgos naturales debidamente acreditados, singularidades agrícolas, forestales o ganaderas, o para la preservación del peculiar sistema de poblamiento del territorio asturiano, así como en función de su sujeción a limitaciones o servidumbres para la protección del dominio público.
- c) Suelo no urbanizable de costas, respecto al cual deben establecerse las medidas de protección que demanden las peculiaridades de las franjas costeras.
- d) Suelo no urbanizable de infraestructuras, comprensivo de los terrenos que resultan afectados por la localización de las infraestructuras básicas o de transporte.
- e) Núcleo rural, como categoría de suelo no urbanizable objeto de ocupación residencial.

Sin embargo, todo este esfuerzo normativo y regulador resulta baldío sin un análisis del territorio riguroso, realizado sobre fuentes de datos espaciales fiables y elaborados con criterios homogéneos para el marco territorial de referencia. A la hora de abordar la redacción de un plan de ordenación territorial o una normativa urbanística de ámbito municipal, los equipos de planificación realizan un notable esfuerzo por aproximarse al conocimiento de la realidad del territorio sobre el que están trabajando contrastándola con su conocimiento o ex-

perencia adquirida en otros espacios. Por tanto, no cabe duda de la utilidad que supone la disponibilidad de documentos de análisis territorial que aporten resultados basados en un análisis conjunto del ámbito regional y puedan ser tomados como referencia para la elaboración y desarrollo de los instrumentos de planificación.

El avance en el conocimiento científico-técnico del territorio, la disponibilidad creciente de fuentes de información temática georreferenciada y las posibilidades de procesamiento de esta información mediante los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han hecho posible que se puedan abordar trabajos como el que aquí exponemos, permitiendo un diagnóstico coherente y más preciso de la realidad territorial.

El objeto de este trabajo es analizar la vocación del suelo rural desde una aproximación holística basada únicamente en características intrínsecas del territorio, proponiendo una zonificación y clasificación urbanística a una escala intermedia (1:15.000 a 1:25.000) que facilite la posterior toma de decisiones de gestión.

La finalidad última es obtener un instrumento útil para la ordenación del territorio que:

- Sirva de guía para los trabajos de zonificación que realicen los diferentes equipos redactores de planeamiento, facilitando así su labor e incrementando la calidad del resultado.
- Garantice cierta uniformidad entre los diferentes planeamientos generales, aun cuando la redacción se aborde por parte de equipos diferentes.
- Permita disponer de una referencia para contrastar los criterios de zonificación del planeamiento, referencia utilizable por el órgano competente de las administraciones que formulan los planeamientos.

## II. ENCUADRE TERRITORIAL

La Comunidad Autónoma del Principado de Asturias se sitúa en el tercio noroccidental de la Península Ibérica, limitando al norte con el Mar Cantábrico, el este con Cantabria, al sur con la provincia de León y al oeste con la de Lugo (Figura 1). Tiene una superficie de 10.600 km<sup>2</sup> y una población ligeramente superior al millón de habitantes, aunque con una distribución territorial muy desigual ya que aproximadamente el 80 % de la misma se localiza en la zona central, mientras que las denominadas “alas” presentan una importante despoblación.

Se trata de un territorio con una gran diversidad de formas del relieve, como resultado de la historia geológica y geomorfológica, lo que ha determinado la aparición de una importante variedad de paisajes y ecosistemas.

El clima es predominantemente oceánico, con abundantes precipitaciones, repartidas a lo largo del año, y suaves temperaturas.

A grandes rasgos, podemos subdividir la región en 5 grandes unidades geomorfológicas: rasa costera, sierras y valles prelitorales, cuenca central, sierras del interior occidental y cordillera cantábrica y montañas de la divisoria.

Los riesgos asociados a la dinámica externa y la hidrología representan los más importantes en la región, mostrando además una distribución territorial cartografiable.

Administrativamente se trata de una comunidad autónoma uniprovincial organizada en 78 municipios o concejos, cada uno de los cuales tiene competencias en materia de urbanismo en sus respectivos territorios mientras las de ordenación

del territorio y recursos naturales le corresponden a la administración autonómica.

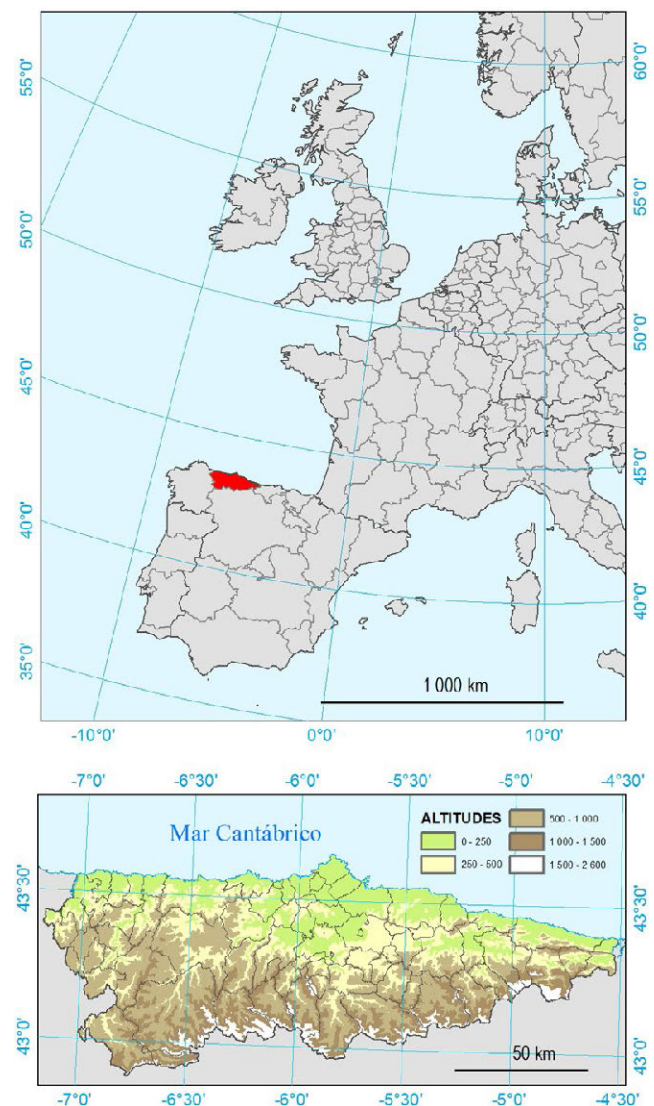


Figura 1. Encuadre territorial.

## III. METODOLOGÍA PARA LA ZONIFICACIÓN URBANÍSTICA DEL SUELO RURAL

### A. SELECCIÓN DE VARIABLES PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MODELO.

La primera tarea a abordar debe consistir en definir las variables de partida para construir el modelo de zonificación. Considerando el necesario carácter aplicado de la metodología y la obligación de asegurar la transferencia de los resultados, inicialmente se establece que las variables a incorporar al modelo deben cumplir al menos cuatro requisitos generales:

- Tener una alta capacidad descriptiva de las características intrínsecas del suelo;
- Ser relevantes para el apoyo de la toma de decisiones de gestión;
- Proceder de fuentes o inventarios cartográficos existentes o poder ser calculadas por métodos automáticos;
- Presentar facilidad para la cuantificación y valoración de forma comprensible para la toma de decisiones por no expertos.

A partir de los resultados obtenidos en ensayos piloto realizados previamente en ámbitos municipales se ha concluido que para definir la vocación del suelo rural y establecer recomendaciones sobre la forma más adecuada de gestión, es necesario disponer de información de al menos cuatro variables:

- Pendiente del terreno.
- Cobertura vegetal dominante.
- Potencialidad edáfica.
- Valor natural.

Evidentemente, el modelo podría incorporar otro tipo de variables que, sin describir características intrínsecas del suelo, en la práctica condicionan su gestión y los usos que en él se van a poder desarrollar. La mayor parte de estas variables responden a condicionantes normativos (protección de espacios naturales, y patrimonio cultural, reservas urbanísticas de suelo, etc.) y limitaciones derivadas de las servidumbres impuestas por los usos preexistentes (infraestructuras viarias, energéticas, perímetros de protección, etc.). Sin embargo, la incorporación de estas variables como criterios de valoración alteraría notablemente la coherencia de los resultados respecto a la finalidad perseguida. Por lo tanto, desde una perspectiva científica se considera que estos condicionantes de gestión deben ser incorporados en una fase posterior una vez obtenida la vocación del suelo mediante criterios objetivos.

#### B. FUENTES DE INFORMACIÓN BASE.

La información de partida fundamental es la contenida en la Cartografía Temática Ambiental del Principado de Asturias (CTAPA) de escala 1:25.000, realizada por el INDUROT durante un intenso periodo de trabajo de 13 años. De la diversidad de capas que componen la CTAPA, para este trabajo se ha utilizado la siguiente información:

- Litología: geología del sustrato y recubrimientos cuaternarios;
- Ríos: red hidrográfica;
- Oso: calidad de hábitat para el oso pardo;
- Roca: áreas de roquedos;
- Vegetación: unidades vegetales.
- Modelo digital de elevaciones.

Asimismo, se incorpora al análisis información sobre taxones y hábitats vulnerables o amenazados y riesgos naturales. La información sobre especies y hábitats procede de los catálogos de la Directiva europea 92/43/CEE, más conocida como Directiva Hábitats, del Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de Asturias (PORN) y de los catálogos regionales de especies amenazadas de fauna vertebrada y flora del Principado de Asturias.

#### C. ESTIMACIÓN DE LA POTENCIALIDAD EDÁFICA.

La variable de potencialidad edáfica se obtiene a partir de la combinación de las capas de pendientes, roquedos y litología de la CTAPA.

La información sobre pendientes se obtiene de un modelo digital de elevaciones de 50 metros de paso de malla, previo contraste de la resolución idónea para los objetivos perseguidos y la escala de análisis. La valoración e integración de la información procedente del modelo digital de pendientes (MDP) se realiza considerando la idoneidad de cada clase de pendiente para el desarrollo de actividades agrarias y forestales: llanas (<12 %), mecanizables (12-35 %) y difícilmente mecanizables (>35 %).

Finalmente, esta capa de pendientes reclasificada se combina con la información litológica y geomorfológica conforme a los criterios establecidos en la Tabla I.

**TABLA I**  
UNIDADES DEL MAPA DE POTENCIALIDAD EDÁFICA

CÓDIGO	DESCRIPCIÓN	PENDIENTE	SUELO
1	Sustratos de cuarcitas, areniscas y pizarras metamórficas con espesor de suelo menor de 50 cm	< 12 %	11
		12 a 35 %	12
		> 35 %	13
2	Sustratos de cuarcitas, areniscas y pizarras metamórficas con espesor de suelo mayor de 50 cm (Formaciones superficiales silíceas)	< 12 %	21
		12 a 35 %	22
		> 35 %	23
3	Sustratos de pizarras y mixtos con espesor menor de 50 cm	< 12 %	31
		12 a 35 %	32
		> 35 %	33
4	Sustratos de cuarcitas, areniscas y filitas con espesor de suelo mayor de 50 cm (Fm. superficiales mixtas)	< 12 %	41
		12 a 35 %	42
		> 35 %	43
5	Sustratos calcáreos con espesor menor de 50 cm	< 12 %	51
		12 a 35 %	52
		> 35 %	53
6	Sustratos calcáreos con espesor mayor de 50 cm (Fm. superficiales calcáreas) y fm. superficiales mixtas sobre sustrato calcáreo	< 12 %	61
		12 a 35 %	62
		> 35 %	63
7	Llanuras aluviales y terrazas	.....	70
8	Suelos hidromorfos y rellenos de depresión	.....	80
9	Roquedos y canchales	.....	90
10	Depósitos antrópicos	.....	100

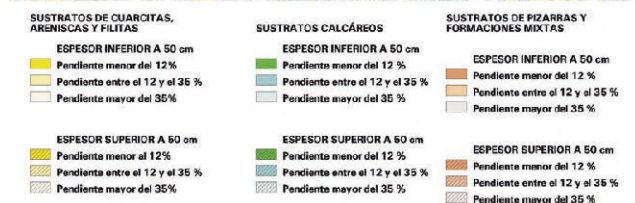
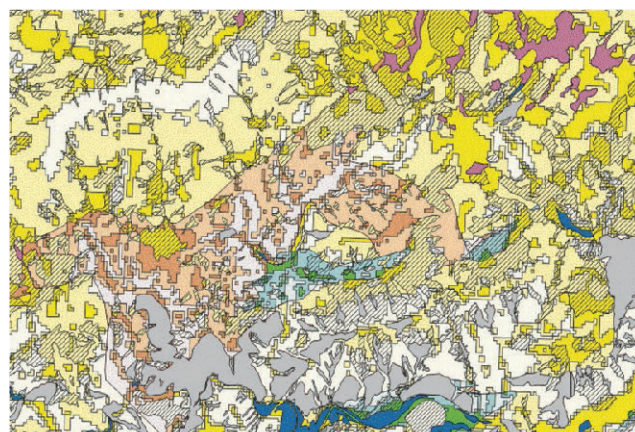


Figura 2. Potencialidad edáfica.

El conocimiento regional de los suelos y los datos obtenidos por combinación entre unidades edáficas y usos actuales permiten dar una propuesta de suelos mejores aplicable en la propuesta de zonificación (Figura 2). De las 22 unidades de suelo establecidas en la tabla 1 se pueden considerar como unidades con potencialidad edáfica más alta todas las de pendiente inferior al 35%. Dentro de estas, los usos agrícolas se concentran especialmente en los sustratos de pendiente inferior al 12% y en las áreas con espesor de material suelto superior a 50 centímetros. La potencialidad edáfica también es alta en las áreas de depósito fluvial.

#### D. ZONIFICACIÓN DEL SUELO DE ESPECIAL PROTECCIÓN.

La información de partida con la que se determinan las áreas a las que por sus características les corresponde una calificación urbanística de suelo no urbanizable de especial protección



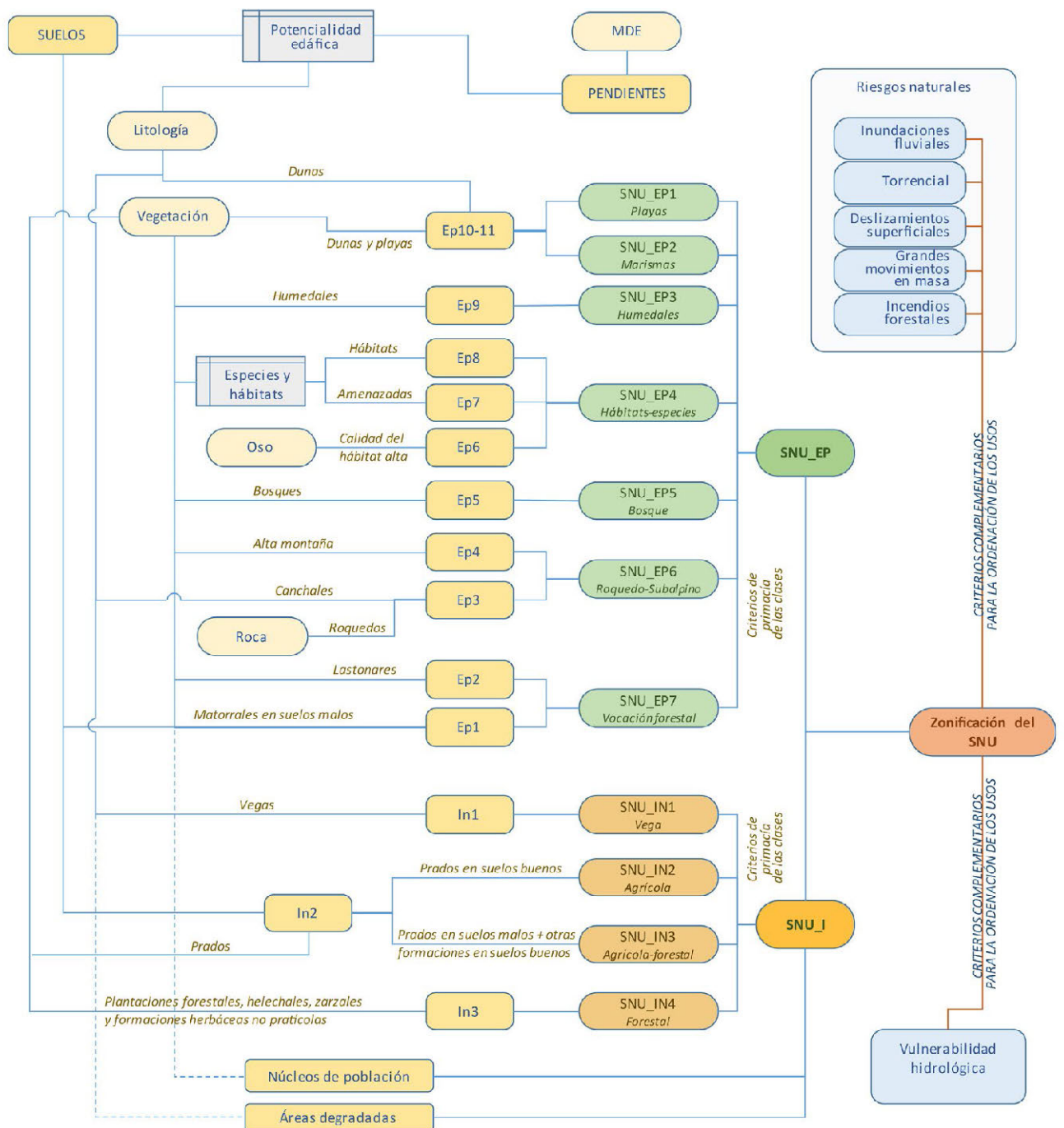


Figura 3. Diagrama general del modelo.

(SNU-EP) procede fundamentalmente de las capas de vegetación, litología, roquedos, suelos y calidad de hábitat para el oso. Asimismo, mediante tablas relacionales se incorpora al modelo la valoración de la cubierta vegetal en relación con su representatividad de los catálogos de protección de hábitats y especies.

Cómo puede verse en la Figura 3, primero se crean capas intermedias (Ep1 a Ep11) como resultado de la aplicación de diferentes criterios de protección cuya combinación da lugar a 7 categorías de suelo con protección:

- SNU-EP1, playas y dunas obtenidas a partir de la selección de elementos en los mapas de vegetación y litológico.

- SNU-EP2, marismas, contenidas en los mapas de vegetación y litológico.
- SNU-EP3, masas de agua (ríos, lagos y lagunas) y zonas encharcadas continentales. Para su elaboración se utiliza el mapa de ríos y el de vegetación.
- SNU-EP4, hábitats prioritarios, ecosistemas amenazados y las áreas de alta calidad para especies en peligro de extinción (oso pardo y listados de plantas). Se incluyen aquí las formaciones representativas de los ecosistemas amenazados señalados en el PORNA y los hábitats prioritarios de la directiva europea, con la excepción de los brezales de

*Erica mackaiana* por su enorme extensión en Asturias y su menor interés ecológico que en otras partes de Europa. Las áreas de alta calidad para el oso pardo cantábrico proceden del mapa de calidad del hábitat para el oso elaborado por el INDUROT, ponderado con la información de la localización de osas con crías suministrada por el Gobierno Regional.

- SNU-EP5, bosques naturales, prebosques, y formaciones arborescentes. En esta categoría se recogen los ecosistemas forestales que deben estar sometidos a un régimen de protección al tratarse de los ecosistemas climáticos. La gestión y la regulación de usos debe favorecer su conservación y expansión.
- SNU-EP6, roquedos, canchales y depósitos de clastos sin matriz procedentes del mapa litológico, de roquedos y vegetación. También se incluyen las áreas de alta montaña así clasificadas en el mapa de vegetación, al considerarse un ecosistema frágil, de gran interés ecológico y escaso interés agrícola y forestal, bien por tratarse de suelos esqueléticos o bien por desarrollarse a alturas muy elevadas con unas condiciones climáticas muy duras.
- SNU-EP7, áreas cuyo uso potencial más adecuado es el desarrollo del bosque autóctono. Se obtiene a partir del mapa de vegetación y del mapa de suelos. Se asignan a esta clase los lastonares y aquellos matorrales (piornales, brezales, tojales y aulagares) que se sitúan sobre suelos pobres o esqueléticos, donde no se aconseja un uso productivo, bien por su pobreza o por su imposible mecanización. Se trata de zonas en las que debe evitarse cualquier laboreo que implique una desestructuración del suelo.

Las capas con la extensión de las diferentes categorías de SNU-EP se fusionan en una única conforme a criterios de primacía de unas capas sobre otras asignando la mayor a la capa EP1 y la menor a la EP7.

#### E. ZONIFICACIÓN DEL SUELO DE INTERÉS.

La información de partida para caracterizar los ámbitos suelo no urbanizable de interés (SNU-I) procede del mapa de suelos, las llanuras aluviales, obtenidas del mapa litológico y las formaciones vegetales de mayor interés agrario o forestal.

Al igual que en el SNU-EP, primero se crean capas intermedias (In1, In2 e In3) como resultado de la aplicación de diferentes criterios de selección atendiendo a la potencialidad productiva (Figura 3) que dan como resultado cuatro categorías de SNU-I:

- SNU-II, vegas de los ríos, extraídas del mapa litológico, son áreas llanas y de suelos profundos, de extraordinaria riqueza y muy poco abundantes en la región. La regulación de usos debería garantizar la conservación de la capacidad productiva y el desarrollo de los usos agrícolas, evitando su transformación mediante la edificación o la construcción de infraestructuras.
- SNU-I2, agrícola, que abarca las actuales zonas de uso agrario desarrollado sobre suelos profundos no incluidos en la categoría de vega. Se obtienen a partir de mapa de vegetación y del mapa edafológico. La regulación de estos suelos debería dirigirse hacia el mantenimiento de los usos agrarios.
- SNU-I3, agrícola-forestal, aquel cuyas características permiten acoger tanto el uso agrícola como el uso forestal de producción. Se incluyen en esta categoría las zonas actualmente ocupadas por prados o pastos con peores condiciones edafológicas, así como el resto de las superficies con

suelos potentes o ricos, que no hayan sido incluidas en alguna de las categorías precedentes.

- SNU-I4, forestal, obtenido a partir de la información edafológica y de vegetación. Incluye las actuales plantaciones arbóreas, excepto las incluidas en el SNU-I3, así como las superficies de matorrales, helechales o formaciones herbáceas no prácticas que hayan sido incluidas en ninguna de las categorías precedentes.

Las capas de las 4 categorías se unen en una única de SNU-I aplicando criterios de primacía de unas clases sobre otras atendiendo a su aptitud productiva desde la más alta de los suelos de vega, SNU-I1, hasta la más baja del suelo de vocación forestal, SNU-I4.

#### F. FUSIÓN DE LOS DATOS.

Una vez obtenidas todas las capas intermedias se procede a la fusión de los datos en una única capa que contiene la zonificación básica del suelo no urbanizable (Figura 3). En primer lugar, se actualiza a la capa de SNU-I las delimitaciones de las entidades de población (asentamientos rurales y áreas urbanas e industriales) y de las áreas degradadas (escombreras y otros depósitos de origen antrópico).

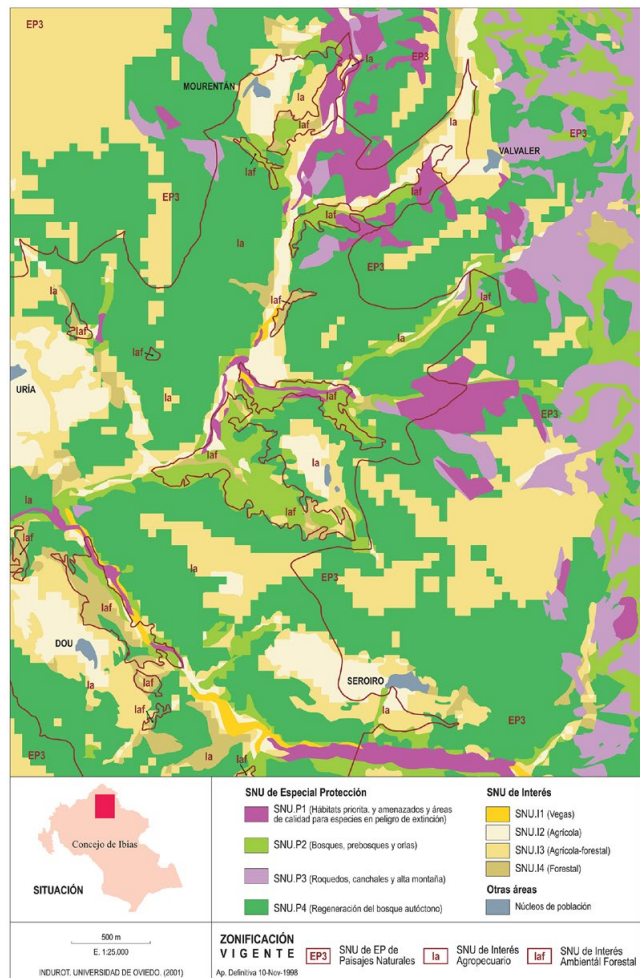


Figura 4. Fragmento de la capa final de zonificación del Suelo No Urbanizable.

Posteriormente, se realiza la fusión con la capa de SNU-EP manteniendo los atributos de origen de forma que sea posible identificar los casos en los que un mismo polígono esté asignado a una categoría de suelo de interés y otra de especial

protección. En estos casos, la asignación final de la categoría de suelo no urbanizable se realiza dando prioridad a los valores ambientales sobre los productivos.

Para la creación de la capa final de zonificación (Figura 4), se eliminan los polígonos con una superficie inferior a 200 m<sup>2</sup> que han aparecido como resultado de la superposición poligonal realizada en la fusión de las capas.

En la representación cartográfica de este mapa final se sobrepone las principales infraestructuras viarias, clasificadas en diferentes categorías, así como las edificaciones procedentes de la cartografía topográfica 1:10 000 del Principado de Asturias.

#### IV. CRITERIOS COMPLEMENTARIOS PARA LA ORDENACIÓN DE USOS

La ordenación urbanística del suelo no urbanizable se materializa en una zonificación del territorio y una normativa regulatoria de los usos. La zonificación del territorio conforme a las categorías predeterminadas por la legislación urbanística, por lo general limita significativamente el número y la diversidad de criterios a considerar para la delimitación de los ámbitos territoriales.

Sin embargo, para una adecuada ordenación del suelo no urbanizable, además de la vocación ambiental y productiva, es necesario incorporar otros criterios de ordenación procedentes de ámbitos temáticos muy diversos, que describen la influencia en el territorio de diferentes políticas sectoriales o procesos ambientales y naturales.

Aunque para muchos de estos criterios complementarios se disponga de una identificación geográfica, en la mayor parte de los casos no es necesario que su integración en la regulación urbanística se realice incrementando la complejidad de la zonificación urbanística del suelo no urbanizable.

Sin embargo, la incorporación en los instrumentos de planeamiento de zonificaciones temáticas, que reflejen la distribución territorial de los criterios complementarios, permitiría complementar la regulación de los usos permitidos y autorizables en cada categoría urbanística de suelo estableciendo condicionantes en las tipologías y modalidades.

Es lo que hemos denominado zonificación horizontal y en este estudio se corresponde con la incorporación de criterios relacionados con los condicionantes derivados de la vulnerabilidad hidrológica y los riesgos naturales.

##### A. VULNERABILIDAD HIDROLÓGICA.

El riesgo de contaminación de las aguas subterráneas por actividades agrícolas, ganaderas o industriales, hace necesaria la realización de una cartografía en la que se establezcan las zonas más vulnerables frente a dicho riesgo.

A partir de la información geológica y geomorfológica complementada con otros datos del relieve como es la pendiente, se puede llegar a establecer una zonificación del territorio en la que se muestre la vulnerabilidad que presenta una zona frente a la contaminación hídrica (Figura 5).

Para establecer las áreas susceptibles frente a vertidos se han seguido los criterios del Mapa Hidrogeológico de España y del Mapa de Vulnerabilidad a la contaminación de los mantos acuíferos, ambos del Instituto Tecnológico Geomineo de España. En estos mapas se establece una división de las formaciones geológicas según su permeabilidad. Así, en la Península Ibérica se establecen cuatro tipos de formaciones

geológicas en función de su permeabilidad que aplicados a Asturias serían:

1. Formaciones consolidadas o compactadas permeables por fisuración-karstificación. En nuestra región se han considerado dentro de este grupo las formaciones calcáreas del paleozoico y del mesozoico. Su grado de vulnerabilidad va a estar en función de su pendiente, diferenciándose zonas de vulnerabilidad alta y media.
2. Formaciones detríticas permeables generalmente no consolidadas. En este segundo tipo irían englobadas las formaciones mesozoicas con arenas y/o intercalaciones calcáreas así como algunas formaciones superficiales como son los depósitos aluviales, los rellenos de depresión, los depósitos litorales y las formaciones clásticas sin matriz o con escasa matriz. Al igual que en el grupo anterior, la vulnerabilidad varía en función de la pendiente, aplicándose para las formaciones geológicas comprendidas en este grupo los mismos rangos de pendiente que para las formaciones permeables por karstificación. Para las formaciones superficiales se han considerado con una vulnerabilidad alta las formaciones con una pendiente inferior al 8 % mientras que el resto de formaciones con pendientes superiores, se considerarán con una vulnerabilidad media.
3. Formaciones de baja permeabilidad o impermeables. El resto de formaciones, tanto geológicas como superficiales, presentes en nuestra región y no incluidas en las clases anteriores, serán consideradas como formaciones de baja permeabilidad o impermeables.
4. Formaciones permeables en terrenos volcánicos. En Asturias no aparecen representadas las formaciones permeables en terrenos volcánicos.

Como complemento a esta cartografía y dado el fuerte relieve de toda la región, se han establecido unos umbrales de pendiente por encima de los cuales se incrementa la escorrentía y como consecuencia disminuye la vulnerabilidad por infiltración.

Entre las clasificaciones que intentan dar más información que la reflejada por el gradiente de pendientes, destaca la propuesta por el Soil Survey Staff (1951), que se ha usado para la clasificación de suelos americanos y que puede tener una aplicación útil en nuestro país. Esta clasificación se basa en el grado de pendiente y en el concepto de pendiente simple o compleja.

De ambas características se pueden deducir consecuencias prácticas, bajo determinadas condiciones del suelo, como son, entre otras, la proporción y cantidad de escorrentía y como consecuencia la capacidad de infiltración de un suelo.

Analizando las características edáficas del suelo el Soil Survey Staff estableció en 1951 una clasificación de los suelos en la que se tenían en cuenta los siguientes rangos de pendiente que serán usados en la realización del mapa de vulnerabilidad hidrológica:

**TABLA II**  
RANGOS DE PENDIENTE QUE SERÁN USADOS EN LA REALIZACIÓN DEL MAPA DE VULNERABILIDAD HIDROLÓGICA.

CLASE	PENDIENTE (%)	DENOMINACIÓN
A+B	0-8%	Pendientes simples y complejas suaves u onduladas
C+D	8-30%	Pendientes simples y complejas fuertes a moderadamente escarpadas
E	30-45%	Pendientes simples y complejas escarpadas

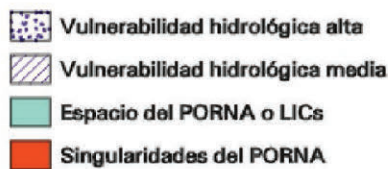
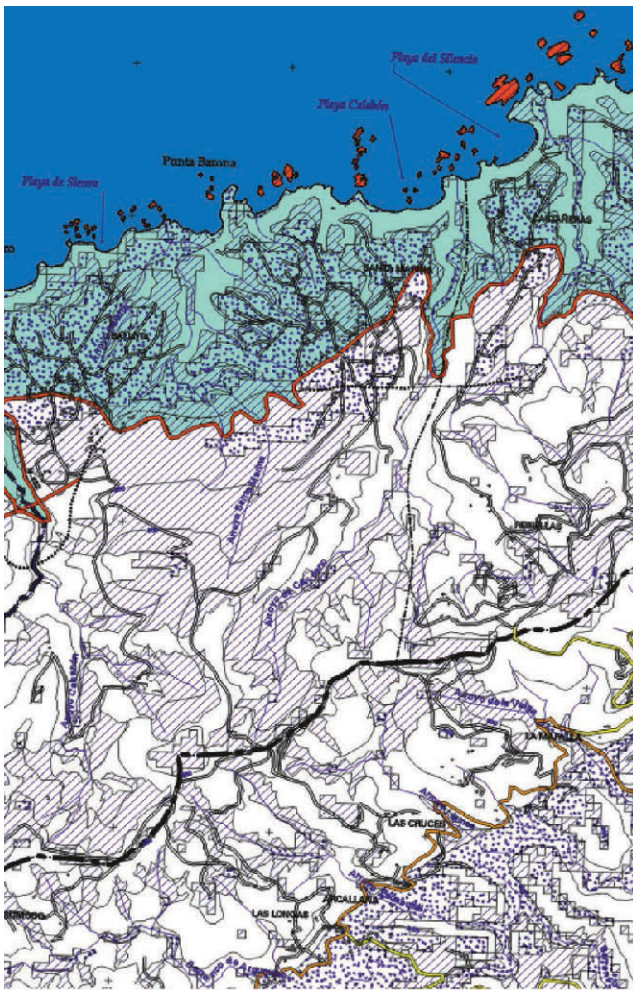


Figura. 5. Representación de la zonificación horizontal por vulnerabilidad hidrológica.

Las clases anteriores sirven para la definición de unidades de suelos y para su clasificación y cartografía y han sido descritas de la siguiente forma:

- Clase A.- La escorrentía superficial es lenta o muy lenta
- Clase B.- La escorrentía superficial es lenta o media
- Clase C.- La escorrentía superficial puede llegar a ser rápida
- Clase D.- La escorrentía superficial es rápida a muy rápida
- Clase E.- La escorrentía superficial es muy rápida

Combinando los criterios litológicos, la presencia de formaciones superficiales y el relieve, se diferencian zonas de vulnerabilidad alta y media frente a la contaminación de aguas subterráneas.

TABLA III  
ZONAS DE VULNERABILIDAD HIDROLÓGICA.

	UNIDADES CONSIDERADAS	JUSTIFICACIÓN
VULNERABILIDAD ALTA	Áreas de sustrato calcáreo con pendiente inferior al 30%	Materiales permeables por fisuración-karstificación / Alta velocidad de circulación de aguas subterráneas
	Áreas de sustrato arenoso (sólo en las formaciones mesozoicas) con pendiente inferior al 8%	Materiales detríticos permeables generalmente no consolidados
	Llanuras aluviales	Materiales detríticos permeables no consolidados / Acuíferos libres y vertido directo a los cauces / Intensa actividad agrícola e industrial
	Rellenos de depresión	Formaciones detríticas permeables generalmente no consolidadas / Zonas preferentes de infiltración
	Depósitos litorales	Materiales detríticos son consolidar Baja pendiente
VULNERABILIDAD MEDIA	Áreas de sustrato calcáreo con pendiente superior al 30% e inferior al 45%	Materiales permeables por fisuración-karstificación / Alta velocidad de circulación de aguas subterráneas
	Áreas de sustrato arenoso (sólo en las formaciones mesozoicas) con pendiente superior al 8% e inferior al 30%	Materiales detríticos permeables generalmente no consolidados
	Zonas de pendiente inferior al 8% (para los sustratos impermeables)	Baja pendiente
	Formaciones superficiales sin matriz	Materiales detríticos permeables no consolidados
	Formaciones superficiales con escasa matriz	
	Terrazas aluviales	
Terrazas terciarias		

## B. RIESGOS NATURALES.

Las medidas para gestionar el riesgo han de basarse en un proceso de toma de decisiones informado, es decir, sobre la base de evaluaciones territoriales del riesgo que permitan, tanto a los gestores como al público en general, valorar los efectos de la exposición a la magnitud del riesgo. Sin embargo, ninguna de las medidas de gestión será realmente eficaz a medio y largo plazo si continuamos incrementando la exposición a los eventos. En consecuencia, una de las claves para una gestión eficaz de los riesgos y para el incremento de la resiliencia del territorio es impulsar una ocupación responsable del espacio que puede verse afectado por procesos naturales potencialmente peligrosos.

En este sentido, tal y como señalaba Olcina Cantos (2004), la capacidad que tiene la ordenación urbanística y territorial en la escala local para orientar y regular los procesos de ocupación del espacio, hace de estos instrumentos de planificación una herramienta eficaz, económica y ambientalmente sostenible para la reducción del riesgo natural.

En el presente estudio se analiza la integración de algunos tipos de riesgos naturales mediante la creación de zonificaciones horizontales y la orientación de las determinaciones normativas que debería contemplar el planeamiento urbanístico. Las capas de información sobre diversos tipos de riesgos considerados son:

- Inundaciones fluviales.
- Inundaciones torrenciales.

- Incendios forestales.
- Inestabilidades: grandes movimientos en masa, deslizamientos superficiales y aludes.



Figura 6. Riesgo de inundación fluvial: extensión de la Zona de Flujo Preferente y de la inundación de 100 años.

#### *Inundaciones fluviales.*

Una de las cuestiones de ámbito territorial que mayor preocupación causa en la sociedad es el riesgo de inundaciones. Se trata del riesgo geológico con mayor capacidad destructiva y mayor trascendencia económica en España (INDUROT, 2003). En el caso de este tipo de inundaciones de origen fluvial la normativa urbanística debe establecer una limitación importante al desarrollo de actividades en la Zona de Flujo Preferente, la de mayor peligrosidad, evitando la implantación de nuevos usos vulnerables (Figura 6). Asimismo, el planeamiento urbanístico deberá establecer criterios constructivos para las edificaciones situadas en zona inundable con el objeto de incrementar tanto la resistencia como la resiliencia de las zonas expuestas. En el primer caso, las medidas tendrán por objeto evitar o minimizar la cantidad de agua que entra en la construcción, mientras que las medidas de resiliencia estarán

dirigidas a minimizar los daños una vez que el agua ha penetrado en los edificios, facilitando la recuperación después de un evento de inundación (DEFRA, 2004). La aplicación de este tipo de medidas no estructurales permitirá reducir la vulnerabilidad de las zonas ocupadas ante los eventos de gran magnitud y severidad de los que les pueden proteger las defensas y canalizaciones.

#### *Inundaciones torrenciales.*

La dinámica torrencial es un proceso habitual en zonas de montaña con una incidencia directa sobre la actividad humana. Se trata de un riesgo de muy difícil anticipación por lo que las medidas de alerta temprana tienen una limitada efectividad. Por otro lado, es un riesgo de marcado carácter local ya que por lo general se trata de sistemas con un tamaño relativamente pequeño.

En este caso la planificación espacial y la regulación urbanística son el instrumento más eficaz para limitar el aumento de la exposición a las inundaciones repentinas, evitando la afectación a equipamientos especialmente vulnerables (sanitarios, asistenciales o educativos) o instalaciones con potencial riesgo de contaminación ambiental (industrias, depuradoras, etc.).

#### *Incendios forestales.*

Los incendios forestales son uno de los riesgos naturales con mayor afección territorial en Asturias (Figura 7). La potencial afección a las zonas habitadas e instalaciones productivas es una de las amenazas más importantes de los incendios forestales. La normativa urbanística puede regular los usos en el interfaz urbano-forestal, en particular en aquellas zonas de alto riesgo, para limitar la exposición de las zonas habitadas y garantizar, en caso de ser necesario, la evacuación en las zonas ya edificadas y en los nuevos desarrollos. Asimismo, el planeamiento urbanístico también podrá contemplar normativa específica para reducir la peligrosidad de los incendios en las zonas más vulnerables regulando, por ejemplo, los usos forestales para limitar la continuidad del combustible y las plantaciones con especies de alta combustibilidad.

#### *Procesos de inestabilidad: movimientos en masa, deslizamientos superficiales y aludes.*

Los pequeños movimientos superficiales, los grandes movimientos de corto alcance y los aludes son riesgos naturales que deben de ser considerados en todas las iniciativas de planeamiento y ordenación del territorio de cualquier región montañosa. Se trata de riesgos relacionados en gran medida con la geología y litología, así como con variables climáticas locales, por lo que su análisis requiere de un enfoque espacial cercano.

Con el término de grandes movimientos en masa se denominan los procesos de inestabilidad que tienen lugar en las laderas de grandes dimensiones y que suponen la erosión y transporte por gravedad de importantes volúmenes de material e inciden en la totalidad o práctica totalidad de la ladera afectada, modificando fuertemente su geometría. Se trata de procesos con una alta peligrosidad ya que, aunque su frecuencia temporal es muy baja, la extensión de territorio que se vería afectada en cada proceso es muy grande.

El riesgo de deslizamientos superficiales (Figura 7) abarca varios procesos de inestabilidad: flujos deslizamientos y movimientos mixtos todos ellos de reducidas dimensiones y que afectan a los niveles menos profundos de las vertientes (INDUROT, 2003). Se trata de un proceso de alta frecuencia en la región asturiana lo que provoca que, aunque cada proceso aislado no involucre la movilización de un gran volumen de

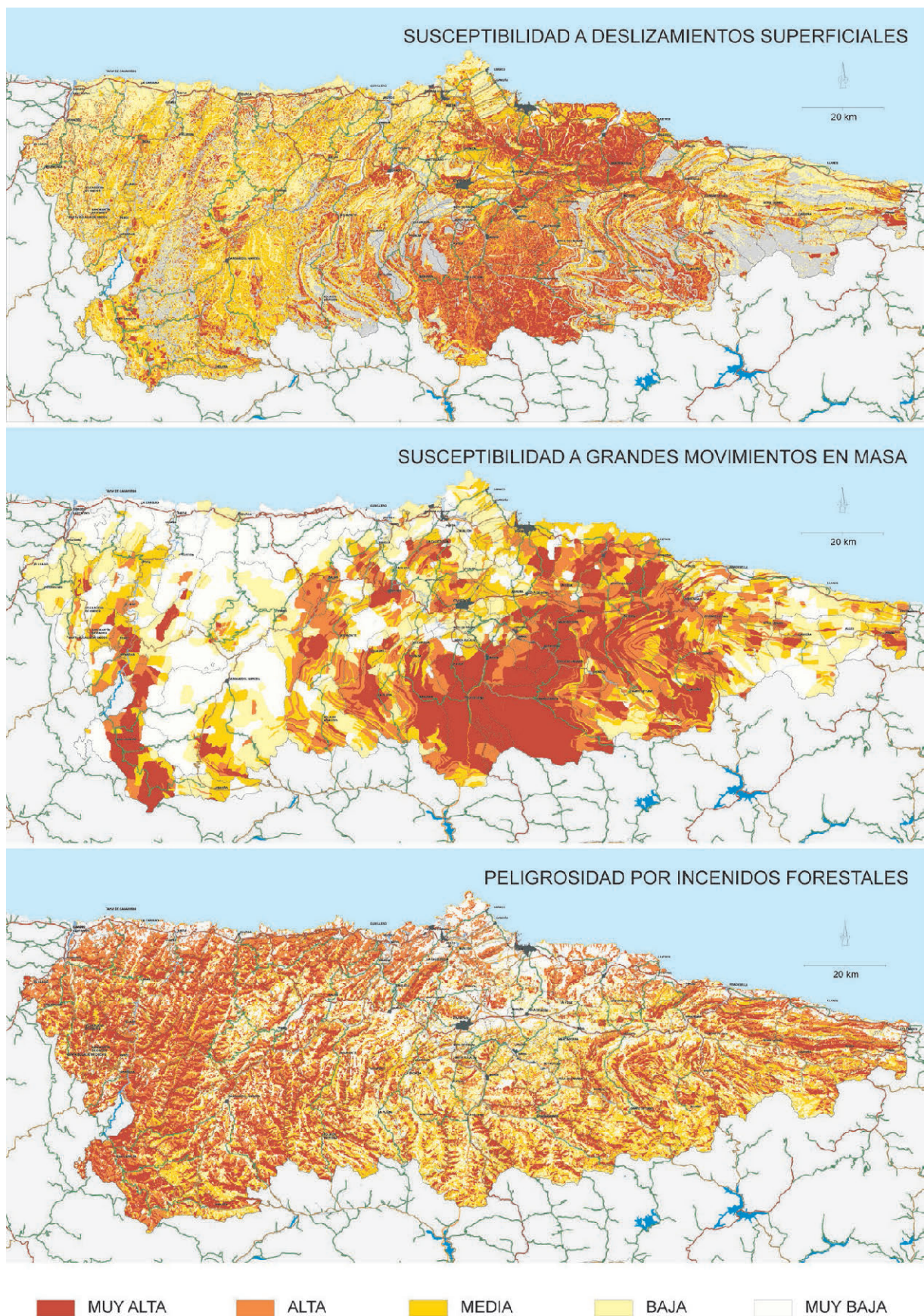


Figura. 7. Clasificación de los riesgos por deslizamientos superficiales, grandes movimientos en masa e incendios forestales.

material, el riesgo y las pérdidas asociadas sean muy elevados (ITGE, 1987; ICOG, 1997). Todos los años estos fenómenos provocan numerosos daños en infraestructuras, con frecuentes cortes de vías de comunicación, deterioro de algunas edificaciones y, en algunos casos, incluso pérdidas de vidas humanas. Los factores desencadenantes de inestabilidades superficiales en las laderas son variados: pérdida de cubierta vegetal, obras e infraestructuras que modifiquen localmente el perfil de la ladera o un periodo de precipitaciones elevadas.

Los aludes constituyen uno de los desastres naturales más frecuentes en las regiones montañosas con climas templados y árticos, en donde las precipitaciones en forma de nieve son importantes. Sin embargo, en Asturias la zona con peligrosidad de avalanchas o aludes es espacialmente mucho más reducida que la de otros riesgos naturales. Existen varias evidencias relacionadas con la dinámica de aludes que permiten la delimitación de zonas activas y potencialmente peligrosas de forma que se puedan adoptar medidas de protección ya que frecuentemente el alud recorre trayectos similares año tras año.

Para este tipo de riesgos la medida más efectiva es limitar el incremento de la exposición de elementos vulnerables. La regulación urbanística, además de limitar la implantación de nuevos usos y actividades en las zonas con mayor peligrosidad, puede establecer condiciones técnicas para que las edificaciones incrementen su resistencia a los deslizamientos o estén protegidas de los ámbitos con una probabilidad de ocurrencia más alta.

Por otro lado, es posible elaborar normativa de carácter preventivo para que la construcción de infraestructuras viarias o de servicio no agraven el problema en las áreas con mayor susceptibilidad a este tipo de riesgos. Finalmente, para las situaciones más extremas se pueden adoptar medidas estructurales de protección para algunos tipos de riesgos como las avalanchas, teniendo en cuenta la magnitud del riesgo y las condiciones ambientales de la zona.

## V. CONCLUSIONES

En este trabajo se ha abordado la integración en un SIG de la mejor información disponible sobre el territorio de Asturias, relativa al modelo digital del terreno, potencial edáfico, usos actuales del suelo y valor del medio natural, juntamente con los riesgos naturales más significativos y la vulnerabilidad hidrológica. Se ha prestado especial atención a la compatibilidad y validez de los datos, tanto en su escala y precisión como en su fecha de elaboración.

Las habituales herramientas de los SIG, juntamente con la implicación de un equipo interdisciplinar con adecuados conocimientos sobre los temas implicados y sobre la realidad del ámbito territorial estudiado, han permitido realizar una zonificación del Suelo no urbanizable teniendo muy en cuenta las indicaciones de toda la normativa vigente, tanto la relativa a la planificación urbanística como la de los distintos ámbitos sectoriales afectados.

El resultado obtenido resulta de gran calidad y competitividad, se apoya en criterios claros y homogéneos para todo el territorio que resultan fácilmente explicables en cualquier análisis o proceso de información pública y su consulta y difusión se ve enormemente facilitada por la calidad de las salidas gráficas y la flexibilidad para presentar los resultados a través de visores o en cualquier otra plataforma digital. Adicionalmente, esta clasificación es dinámica y permite la

reclasificación a partir de un eventual cambio en los datos de partida o en los criterios utilizados.

La metodología desarrollada permite la integración de información temática diversa para analizar la vocación del suelo rural basada en las características intrínsecas del territorio, proponiendo una zonificación y clasificación urbanística a una escala intermedia (1:15.000 a 1:25.000) que facilite la posterior toma de decisiones de gestión. Adicionalmente, es necesario completar esta zonificación es básica del suelo rural, y el régimen de usos asociado a la misma, mediante la incorporación de criterios complementarios de ordenación de las actividades en los que se considere la incidencia territorial de algunos procesos y dinámicas ambientales como los riesgos naturales.

En definitiva, el sistema de clasificación del SNU facilita a la administración regional en este territorio el ejercicio de sus competencias de valoración y un control de los Planes Generales de Ordenación Urbana a la escala municipal, con criterios objetivos y homogéneos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo recoge una parte de los resultados de la extensa colaboración del INDUROT de la Universidad de Oviedo con la administración del Principado de Asturias, que ha financiado muchos de los trabajos a los que se refiere el artículo.

## **REFERENCIAS**

- Asturias (1993). Plan de Ordenación de los Recursos Naturales de Asturias. Consejería de Medio Ambiente y Urbanismo. Principado de Asturias.
- Asturias (1998). Normas Urbanísticas Regionales en el Medio Rural de Asturias. Consejería de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente. Principado de Asturias.
- Asturias (2008): Decreto 278/2007, de 4 de diciembre, por el que se aprueba el Reglamento de Ordenación del Territorio y Urbanismo del Principado de Asturias. Boletín Oficial del Principado de Asturias 38, de 15 de febrero de 2008.
- CEMAT. (1983). Carta europea de ordenación del territorio. Conferencia Europea de Ministros Responsables de la Ordenación del Territorio. Consejo de Europa.
- DEFRA (2004). Making space for water. Developing a new Government strategy for flood and coastal erosion risk management in England. Londres. Department for Environment, Food and Rural Affairs.
- España (2015). “Real Decreto Legislativo 7/2015, de 30 de octubre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Suelo y Rehabilitación Urbana”. Boletín Oficial del Estado 261, de 31 de octubre de 2015.
- ICOG (1997): Guía ciudadana de los Riesgos Geológicos. Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España. Madrid. 196 pp.
- INDUROT (2003): Riesgos naturales de Asturias. Principado de Asturias. Principado de Asturias.
- ITGE (1987). Impacto económico y social de los riesgos económicos en España. ITGE, Madrid.
- Olcina Cantos, J. (2004). “Riesgo de inundaciones y ordenación del territorio en la escala local: el papel del planeamiento urbano municipal”. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 37, 49-84.
- Soil Survey Staff (1951). Soil Survey Manual. USDA Handbook 18. Washington.
- Tojo, J. F., y Naredo, J. M. (directores) (2010). Libro blanco de la sostenibilidad en el planeamiento urbanístico español. Ministerio de Vivienda. Gobierno de España.



# La ordenación territorial y las fuentes renovables de energía

Rodríguez Gámez María, Vázquez Pérez Antonio, W. Manuel Saltos Arauz

Carrera de Eléctrica/Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas/Universidad Técnica de Manabí  
Avenida Urbina y Che Guevara, Portoviejo/Manabí/Ecuador  
taliangel270557@gmail.com, antonio2506@gmail.com, wsaltos@gmail.com

## RESUMEN

La ordenación y la planificación territorial constituye un instrumento de transparencia, que puede ser utilizado como herramienta administrativa, brindando las posibilidades técnicas para la intervención en el territorio y donde los Sistema de Información Geográfica (SIG), permiten determinar los diferentes parámetros que en materia energética inciden en cada área, ayudando al mejoramiento de la eficiencia de su aprovechamiento y a la toma de decisiones adecuadas para la instalación de los sistemas próximos al consumo. Este enfoque no solo es válido para las fuentes renovables; sino también que pueden ser utilizadas para la implementación de las inversiones relacionadas con la explotación de los combustibles fósiles y la evaluación de sus impactos al medio, partiendo de los conceptos de que la producción de energía a nivel global es una de las actividades que más impactan al medio ambiente.

Los SIG, son una herramienta que se pueden utilizar en los análisis de potenciales de las fuentes renovables de energía, pues se encuentran dispersas en el espacio y pueden ser proyectadas con una visión territorial distribuida; se pueden realizar los estudios de impactos económicos, sociales y ambientales asociados a su conexión a la red convencional de distribución.

En la política de Ecuador se direccionan los procesos energéticos hacia el cambio de la matriz, esto no solo puede estudiarse con la hidráulica; sino que se pueden incorporar otras fuentes de energía según los valores del potencial disponible en cada territorio. El objetivo de la investigación en exponer las potencialidades de los SIG en la planeación territorial energética y su uso con una nueva visión consistente en la incorporación de los procesos energéticos enfocados en los nuevos conceptos tecnológicos como son: la inteligencia artificial, las microrredes, las redes inteligentes y la inteligencia artificial.

Palabras clave: **Gestión energética sostenible, desarrollo local, generación distribuida, fuentes renovables de energía, energía solar.**

## ABSTRACT

*The planning and territorial planning is an instrument of transparency, which can be used as an administrative tool, providing the technical possibilities for intervention in the territory and where the Geographic Information System (GIS), allow to determine the different parameters that in energy matters Affect each area, helping to improve the effi-*

*ciency of their use and making appropriate decisions for the installation of systems close to consumption. This approach is not only valid for renewable sources; But also that they can be used for the implementation of investments related to the exploitation of fossil fuels and the evaluation of their impacts to the environment, starting from the concepts that the production of energy at the global level is one of the activities that most impact to the environment.*

*GIS are a tool that can be used in the analysis of potential of renewable energy sources, since they are scattered in space and can be projected with a distributed territorial vision; the studies of the economic, social and environmental impacts associated with its connection to the conventional distribution network can be carried out.*

*In the politics of Ecuador the energy processes are directed towards the change of the matrix, this not only can be studied with the hydraulics; But other energy sources can be incorporated according to the potential values available in each territory. The objective of the research is to expose the potential of GIS in the territorial planning of energy and its use with a new vision consisting in the incorporation of energy processes focused on the new technological concepts such as: artificial intelligence, microgrids, networks Intelligence and artificial intelligence*

**Keywords: Sustainable energy management, GIS, microgrids, distributed generation, artificial intelligence.**

## I. INTRODUCCIÓN

Las crisis del petróleo y la contaminación provocada durante la generación de energía a base de la utilización de los combustibles fósiles, así como para la transmisión, distribución y suministro del servicio eléctrico, ha propiciado que el desarrollo energético actual se enfoque al uso de tecnologías limpias. Esa iniciativa ha impulsado la introducción de tecnologías que disminuyen el consumo de petróleo en la generación, reduciendo los gastos económicos por concepto de producción de electricidad y reducción de impactos ambientales.

Por otro lado, la introducción de tecnologías limpias se ha venido incrementando a partir del concepto de que las FRE se encuentran distribuidas en el espacio territorial, que se pueden aprovechar de forma descentralizada y con ello generar la electricidad próxima a los centros de consumo, disminuyendo las pérdidas por transmisión y distribución y los gastos por concepto de inversión tecnológica, ya que en los esquemas distribuidos de generación, resulta menos necesarios los transformadores y la construcción de nuevas líneas eléctricas.

Lo antes analizado permite definir que el tema se convierta en una tarea no solo para los ingenieros, sino que constituye un problema de carácter transdisciplinario, donde intervienen diferentes ciencias por ejemplo: la necesidad de los estudios de los potenciales renovables (solar, viento, biomasa, hidráulico, geotérmico, mareomotriz entre otros), requieren el auxilio de las ciencias geográficas, el ordenamiento territorial, la meteorología, la física, la química, la astronomía y otras ciencias que para tales efectos deben vincularse con la ingeniería eléctrica. Cada tipo de potencial en la mayoría de los casos es estudiado por personas con perfiles diferentes, donde las técnicas de trabajo de grupo de proyecto, pueden jugar un rol determinante.

La implementación de las tecnologías renovables requiere en la mayoría de sus aplicaciones de espacios para su introducción, situación que en la actualidad no en todos los casos se toma en consideración, resultando un aspecto técnico que pasa por alto la consideración de los impactos ambientales que estas tecnologías pueden ocasionar.

Conociendo que el principio fundamental de la ordenación territorial es la organización del espacio, se deben poner en práctica diversas técnicas que ayuden a gestionar los terri-

torios, de manera que las tecnologías renovables se logren introducir bajo conceptos de sostenibilidad.

La ordenación y la planificación territorial constituye un instrumento de transparencia, que puede ser utilizado como herramienta administrativa, brindando las posibilidades técnicas para la intervención en el territorio y donde los Sistema de Información Geográfica (SIG), permiten determinar los diferentes parámetros que en materia energética inciden en cada área, ayudando al mejoramiento de la eficiencia de su aprovechamiento y a la toma de decisiones adecuadas para la instalación de los sistemas próximos al consumo.

Este enfoque no solo es válido para las fuentes renovables; sino también que puede ser aplicado para la implementación de las inversiones relacionadas con la explotación de los combustibles fósiles y la evaluación de sus impactos al medio, partiendo de los conceptos de que la producción de energía a nivel global es una de las actividades que más impactan al medio ambiente.

Los SIG, son una herramienta que se pueden utilizar en los análisis de potenciales de las fuentes renovables de energía, pues se encuentran dispersas en el espacio y pueden ser proyectadas con una visión territorial distribuida; pero además permite realizar los estudios de impactos económicos y ambientales asociados a su conexión a la red convencional de distribución.

En la política de Ecuador se direccionan los procesos energéticos hacia el cambio de la matriz de generación, esto no solo puede estudiarse con la hidráulica; sino que se pueden incorporar otras fuentes de energía según los valores de potencial disponible en cada territorio.

El objetivo de la investigación radica en exponer las potencialidades de los SIG en la planeación territorial energética y su uso con una nueva visión consistente en la incorporación de los procesos energéticos enfocados en los nuevos conceptos tecnológicos como son: la inteligencia artificial vinculada a las microrredes y las redes inteligentes.

## II. MÉTODO

Se utilizó el método deductivo, que parte de determinadas premisas para obtener como conclusión una premisa general que permita demostrar la potencialidad de los SIG en el pla-

neamiento energético sostenible de los territorios utilizando las fuentes de energía de que se dispone. Logrando obtener información derivada relevante sobre la ordenación territorial del espacio y su vinculación con la protección ambiental. Además, el trabajo se apoya en la revisión bibliográfica de diversos artículos científicos y datos de instituciones del Ecuador, que permiten llegar a conclusiones precisas sobre el tema que se estudia.

Los resultados están orientados a lograr territorios más sostenibles energéticamente, donde los usuarios se convierten en productores y gestores de su propia energía. Las conclusiones se enfocan en la proyección de la planeación territorial energética, considerando los elementos espaciales que intervienen en el medio para lograr la sostenibilidad de los recursos y territorios.

### III. RESULTADOS

#### LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG) COMO HERRAMIENTAS DE DESARROLLO

La introducción de las tecnologías renovables en cualquiera de los modos y formas que se aplique, requiere la realización de estudios espaciales para conocer entre otras exigencias: la disponibilidad y calidad de potenciales energéticos; disponibilidad del espacio territorial para acometer las inversiones; los riesgos ambientales; riesgos de desastres naturales; intereses previstos en las perspectivas del desarrollo futuro de los territorios; entre otros. En este caso las tecnologías vinculadas con los sistemas de información geográfica (SIG), resultan herramientas muy importantes para viabilizar y transparentar los análisis que sean necesarios realizar.

Como antecedentes se puede plantear que resulta relevante el hecho, de que los países que han venido ocupando posiciones de avanzada en la implantación de las tecnologías que aprovechan la energía solar para generar electricidad, correspondan a naciones que por su ubicación geográfica reciben un menor nivel de radiación solar que el Ecuador. Ejemplo de ello se pueden citar algunos países que en los últimos años continuaron impulsando las iniciativas fotovoltaicas, como son los casos de Alemania, Italia y Gran Bretaña (UNEF, 2015).

La mayor parte de las inversiones fotovoltaicas realizadas en los últimos años, se han basado en los conceptos de la generación próxima a los consumidores, donde se puede experimentar una disminución de las pérdidas por transmisión y distribución, reducción de los impactos ambientales no solo por emisiones, sino también por el uso del suelo, así como por el reajuste en la utilización de tecnologías.

Alemania continua figurando como uno de los líderes mundiales en potencia fotovoltaica instalada y se destaca el hecho de que desglosando los datos en energía solar y energía eólica instalada, el 50% de la energía solar es propiedad de individuos y granjas que figuran como productores independientes, mientras que el 54% de la energía eólica está en manos de los mismos grupos (Saltos, 2015).

En el modelo alemán sobresale la descentralización en la generación, mayor relocalización y regionalización de la actividad económica, un cambio democrático en el control de los recursos y una ruptura en la forma en que la electricidad se ha generado durante el último siglo, donde el mundo se hace más pequeño mientras más conectado y manejable y por lo tanto de alguna manera más grande al mismo tiempo.

La enorme ventaja de este modelo, es que esta clase de iniciativa alienta la inversión privada desde las empresas hasta las

viviendas individuales utilizando sus propiedades y poniendo en juego sus recursos propios, convirtiéndose en generadores de su propia energía y contribuyendo con su aporte al consumo social.

Los llamados SIG constituyen un conjunto de herramientas que integran y relacionan diversos componentes (usuarios, hardware, software, procesos, etc.), que permiten la organización, almacenamiento, manipulación, análisis y modelización de grandes cantidades de datos procedentes del mundo real y que están vinculados a una referencia espacial, facilitando la incorporación de aspectos sociales, culturales, económicos y ambientales que pueden conducir a la toma de decisiones de una manera más eficaz (G María Rodríguez & Colectivo de autores, 2013).

En algunos casos para realizar las inversiones, se suelen utilizar grandes espacios de terreno que se inhabilitan para otros usos y la utilización de los SIG puede facilitar una evaluación más profunda y multilateral sobre el uso del suelo, en función de economizar y optimizar la utilización del espacio. Este resulta un elemento clave para las evaluaciones relativas a la introducción de la tecnología fotovoltaica, pues los módulos fotovoltaicos pueden instalarse indistintamente a nivel del suelo o en las superficies y techos de edificaciones y casas.

Los primeros estudios desarrollados en que se utilizaron los SIG asociados a los potenciales renovables, fundamentalmente el solar, se remontan al 2000 y fueron empleados esencialmente en la electrificación rural (Amador, 2000).

Los SIG son herramientas que ayudan a la gestión del territorio; en el 2004 fueron utilizados para analizar el papel de las energías renovables como alternativa energética (Domínguez, 2002) que permitiese alcanzar un mayor grado de independencia de los recursos petrolíferos. En tal sentido, se comenzaron a tener en cuenta los aspectos ambientales y la demanda social, para actuar como impulsores en el desarrollo de una nueva etapa en la utilización de las energías renovables.

Otros estudios han permitido definir que para la inversión en sistemas de generación eléctrica es necesaria su vinculación con las exigencias del ordenamiento territorial y solo de esta manera lograr su introducción en áreas viables, donde sea realmente factible realizar las inversiones, teniendo en cuenta el uso del suelo, y favorecer la transición hacia un nuevo modelo energético diverso y sostenible (Díaz, 2009).

En algunos países latinoamericanos se utiliza en el área energética para diferentes usos, por ejemplo en estudios de ordenación territorial de potenciales renovables en la Isla de Cuba (G M Rodríguez, 2012), donde se realizó un estudio de los potenciales renovables y se determinaron las áreas con condiciones para realizar inversiones en sistemas conectados a red, determinando la eficiencia en el uso de las líneas eléctricas para cada tipo de energía, este estudio permitió hacer un análisis para los sistemas aislados con microrredes en energía solar, eólica, biomasa e hídrica.

Otro de los estudios realizados con la ayuda de los SIG como herramienta de análisis, se encuentra vinculado con la planificación integrada de electrificación (Parrondo & autores, 2013), donde es llevado a cabo un análisis de sensibilidad alternativo, en los que se ha estudiado la influencia de cinco parámetros del costo de la generación de la energía de cada tecnología para todo el territorio: por ejemplo en la generación eólica, la tarifa eléctrica, el precio del diésel, la potencia contratada y la demanda energética por vivienda (ligados estos dos últimos).

A medida que se han ido estudiando de manera integrada los potenciales renovables existentes en algunos territorios, como es el caso de la provincia de Manabí se ha podido estudiar la factibilidad de su introducción lo más próximo posible a los centros de consumo, de forma tal que en un mismo lugar se pueden aprovechar más de una de ellas independientemente o haciendo sistemas híbridos hasta logrando satisfacer la demanda, con un resultado adecuadamente económico y sostenible en lo ambiental.

Una de las particularidades que ofrecen los SIG, es que sus bases de datos se encuentran georreferenciadas, permitiendo hacer análisis en tiempo real de lo que ocurre físicamente en los sistemas, incluyendo la situación de la generación y del consumo de la energía. Esto permite a los usuarios hacer consultas rápidas y eficaces en cuanto a la confiabilidad de la información (Saltos, 2015).

Por su parte la ordenación y la planificación territorial, constituyen instrumentos de transparencia, que puede ser utilizados como herramientas administrativas, brindando las posibilidades técnicas para la intervención en el territorio, y donde, además, con la utilización del SIG, permiten determinar la potencia de energía renovable que incide en cada área, ayudando al mejoramiento de la eficiencia de captación y a la toma de decisiones adecuadas para la instalación de los sistemas próximos al consumo.

#### LAS FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA EN LA PROVINCIA DE MANABÍ. ESTUDIO DE CASO.

A partir de la información seleccionada se utilizó la radiación incidente en una superficie horizontal del Ecuador, pudiendo definir que la radiación solar global no tiene diferencias con la del plano inclinado, dada la ubicación latitudinal geográfica del territorio estudiado.

Se tomaron valores promedios en un periodo de 22 años (julio 1983 - junio 2005). Cada valor mensualmente promediado es evaluado como el promedio de los valores obtenidos cada tres horas y promediando un valor diario y llevado al promedio mensual.

Con esos valores se elaboró el mapa del potencial solar promedio anual a escala cromática para la provincia de Manabí en kWh/m<sup>2</sup>/día, que se muestra en la figura 1, donde se puede observar que el comportamiento territorial no es uniforme y varía en todo el espacio geográfico de la provincia, por lo que resulta oportuno determinar, hasta que medidas las áreas de mayor radiación se encuentran en los centros urbanos de mayor concentración del consumo de electricidad, principalmente durante las horas del día, cuando la radiación solar se encuentra disponible.

Los resultados del análisis pueden aportar la certeza, de hasta donde resulta factible introducir la tecnología fotovoltaica, fundamentalmente los sistemas conectados a la red y que energía de la red puede ahorrarse mediante el aporte de la generación fotovoltaica.

Con el fin de apoyar el cambio de matriz energética que hoy se ha trazado como política el Ecuador, esta información puede constituir una reserva potencial de análisis para facilitar la materialización de la voluntad política expresada en el Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017, incorporando otras fuentes de generación como pueden ser la solar y eólica.

Durante el manejo de la información con el SIG se pudo comprobar, que todo el territorio de la provincia de Manabí posee un potencial solar que puede ser aprovechado para la gene-

ración de electricidad, tanto en sistemas conectados a la red, como en sistemas autónomos para la electrificación rural, el bombeo de agua y la iluminación fotovoltaica. La radiación solar promedio anual más intensa se concentra en la parte centro, el sur y el noroeste de la provincia, con valores promedios para un año entre 4,7 kWh/m<sup>2</sup> día y 5,2 kWh/m<sup>2</sup> día.

La interpretación energética del potencial solar de la provincia de Manabí permite definir, que el aprovechamiento de la radiación solar mediante la aplicación de la tecnología fotovoltaica en el modo de las microrredes, puede representar una productividad específica promedio anual entre 1,11 MWh/kWp y 1,44 MWh/kWp. Los cálculos para obtener la productividad específica fueron realizados mediante la ecuación [1].

$$PE=PS*Ac*\eta_c*\eta_s*dAs \quad (1)$$

Donde:

PE→ Productividad específica (kWh/kWp).

PS→Potencial solar promedio anual (kWh/m<sup>2</sup> día).

Ac→Área de captación de la radiación solar por parte de los módulos FV (6,4m<sup>2</sup>/kWp).

ηc→Eficiencia de captación de las células de la energía primaria del Sol (14%).

ηs→Eficiencia de trabajo promedio del sistema fotovoltaico en el ciclo de vida (85%).

dAs→ Días del año solar (362 días).

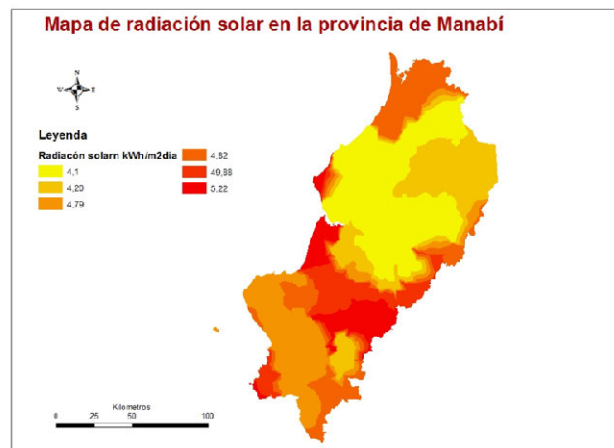


Figura 1. Mapa de radiación solar promedio anual en la provincia de Manabí

Los resultados mostrados anteriormente permiten definir, que las condiciones del potencial solar en toda la provincia permiten la introducción de las tecnologías fotovoltaicas a gran escala en el modo de la generación distribuida, aprovechando el formato técnico de las microrredes.

Al propio tiempo se puede plantear, que si se considera la situación técnica del sistema eléctrico de la provincia de Manabí, las pérdidas energéticas por transmisión, distribución y suministro de energía pueden ser superiores al 30%, entonces se puede estimar que por cada kWh consumido en la provincia, se generan por lo menos 1,3 kWh, lo que permite afirmar que por cada MWp de fotovoltaica instalado en el modo de las microrredes, se pudiera evitar anualmente el consumo de la red entre 1,44 GWh en las zonas donde incide el potencial solar más bajo y 1,87 GWh en los sitios donde incide la radiación solar más elevada. Esto es equivalente a una potencia de generación entre 164 kW a 213 kW que puede ahorrarse.

Definiendo un índice de consumo promedio de combustible para la generación térmica, equivalente a 0,25 ton/MWh, se puede calcular el volumen aproximado del petróleo evitado anualmente por la generación fotovoltaica de 1 MWp instalado en el modo de las microrredes, que pudiera encontrarse entre las 359 ton y 468 ton. Además, si se considera un índice de emisiones de CO<sub>2</sub> promedio de 0,9 ton/MWh generado con térmica, se pudiera estimar que las emisiones a la atmósfera pueden reducirse entre 1293 ton y 1683 ton de CO<sub>2</sub> anualmente.

Los resultados de las mediciones del potencial solar promedio anual (PS), presenta 7 valores, a los que corresponde una productividad específica (PE) por cada uno. En la tabla 1 se muestran los resultados de las simulaciones basadas en el supuesto de lograr introducir en las condiciones de la provincia de Manabí, 1 MWp de tecnología fotovoltaica (FV) en el modo de las microrredes. Se exponen las estimaciones de: Energía fotovoltaica que puede generarse (EFvg); Total de energía de la red evitada, que incluye el 30% estimado de pérdidas en la provincia de Manabí (Ere); Petróleo evitado (Pe); y las emisiones de CO<sub>2</sub> que se pueden reducir (CO<sub>2r</sub>).

**TABLA I.**  
Resultados para simulaciones de microrredes (1 MWp) en la provincia de Manabí.

PS (KWH/M <sup>2</sup> DÍA)	PE (KWH/KWP AÑO)	EFVG (MWH)	ERE (MWH)	PE (TON)	CO <sub>2</sub> R (TÓN)
4,000	1103	1,1	1,4	358	1290
4,100	1130	1,1	1,5	367	1323
4,200	1158	1,2	1,5	376	1355
4,700	1296	1,3	1,7	421	1516
4,800	1323	1,3	1,7	430	1548
4,900	1351	1,4	1,8	439	1581
5,200	1434	1,4	1,9	466	1677

La provincia de Manabí es una de las que mayor área de costa posee en el país, con numerosas poblaciones distribuidas a todo lo largo del litoral, además de instalaciones turísticas, donde podría incrementarse la autogeneración como un aporte diversificador de las fuentes renovables, entre las que se destaca además de la solar fotovoltaica, la energía eólica, dado el potencial de estas en esas zonas.

Siguiendo una metodología similar a la empleada para el estudio del potencial solar, se logró realizar la representación espacial y la determinación de los cálculos energéticos y ambientales para la energía eólica. De esta manera con solo hacer un clip encima del punto que se desea conocer, se puede obtener la información sobre el potencial de viento y realizar los cálculos correspondientes para su introducción.

La información generada permitió definir que existen algunas zonas que poseen un potencial eólico adecuado que pudiera ser aprovechado con pequeñas y medianas instalaciones conectadas a la red. Estas son instalaciones sencillas, fáciles de manejar y con costos muy asequibles que actualmente están disminuyendo, lo que las hace muy competitivas en el formato de las micro redes, especialmente muy útiles para su inserción en el ambiente turístico, no solo por la energía que pueden aportar, sino por el mensaje ambiental que son capaces de transmitir a la sociedad.

En la figura 2 se puede observar el mapa de la provincia de Manabí con la velocidad de viento promedio anual, así como las comunidades ubicadas en el litoral y cuando se considera esta información vinculada con otras fuentes renovables, se pueden realizar diferentes análisis para los estudios de pene-

tración de las fuentes renovables, así como los que se encuentran asociados a las micro redes.

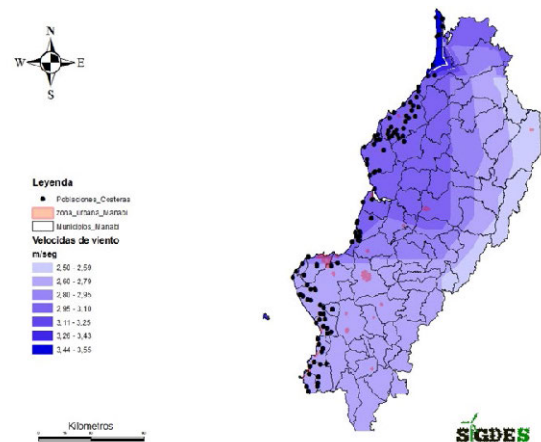


Figura 3. Mapa de la velocidad de viento promedio anual de la provincia de Manabí y pueblos del litoral.

Cuando se valoran los resultados de los potenciales solar y la velocidad de viento, se puede notar que para la región sur de la provincia existe un potencial solar adecuado, así como se localizan algunos puntos en la parte norte con potencial de viento adecuado y que existen poblaciones que se encuentran en ese territorio con una afluencia turística de consideración. La idea es que las condiciones son propicias para que se invierta en pequeñas instalaciones renovables conectadas a la red en el formato de las microrredes

#### IV. CONCLUSIONES

- I. El trabajo logra mostrar un análisis relacionado con la contribución que puede ofrecer el desarrollo energético local a la mitigación de los efectos del cambio climático, partiendo del aprovechamiento de los recursos endógenos bajo el criterio de lograr la combinación de la generación distribuida y el tradicional sistema de generación centralizada, dirigido al mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad.
- II. Se logra argumentar la necesidad de transitar de un sistema centralizado que privilegia el formato técnico de grandes centrales generadoras, con complejos sistemas de transportación y distribución, a uno que considere el aprovechamiento gradual de los recursos endógenos para la generación de electricidad en el modo de la generación distribuida, que logre disminuir el consumo de recursos naturales, que reduzca las pérdidas, que incremente la eficiencia, que propicie la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y logre mejorar la calidad del servicio eléctrico.

## **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece a la Universidad y a sus administrativos por permitir realizar la investigación.

## **REFERENCIAS**

- Altshuler, J., & Colectivo de autores. (2004). Energía. Suplemento Especial de Energía CUBAENERGÍA, Editorial Academia.
- Montesino, L. R. A. (2010). Solarización Territorial. Vía para el logro del desarrollo sostenible. CUBASOLAR. ISBN: 978-959-7113-39-3, La Habana, Cuba.
- Rodríguez, G. M. (2015). SIGDES. Facultad de Ciencias Matemática, Física y Química de la Universidad Técnica de Manabí, Sistema de Información para el Desarrollo Energético Sostenible.
- Rodríguez, G. M., & Washintong, C. J. (2015). Factibilidad económica de la extensión de la red eléctrica (comunidades rurales de Chone). XXX Seminario Nacional del Sector Eléctrico. Riobamba 15, 16 y 17 de abril de 2015, AC.5.1. Sostenibilidad de proyectos en energías renovables en sistemas aislados.
- Saltos, A. W. M., & Colectivo de autores. (2017). Sistemas de información geográfica y microrredes Revista Cubana de Ingeniería. Vol. VIII, No. 1, enero - abril, 2017, pp. 00 - 00, ISSN 2223 -1781.
- SENPLADES. (2013). Plan Nacional del Buen Vivir. 2013-2017. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. Gobierno de Ecuador, ISBN-978-9942-07-448-5.
- Toala, A. G., & Colectivo de autores. (2017). Climatization. Energy Efficiency and Environmental Protection. IRJEIS. International Research Journal Of Engineering, IT E Scientific Research, Vol. 3 Issue. 2: March 2017. ISSN: 2454-2261. Impac Factor: 5.211.
- Vázquez, P. A., & Washintog, C. J. (2015). La energía solar en la provincia de Manabí y el déficit de un marco regulatorio adecuado. XXX Seminario Nacional del Sector Eléctrico. Riobamba 15, 16 y 17 de abril de 2015, Área A. C. 2 Regulación del sector eléctrico y aspectos legales. AC.2.1. Análisis del nuevo marco legal del sector eléctrico ecuatoriano.
- Washintong, C. J., & Rodríguez, G. M. (2015). Impacto ambiental de las redes eléctricas próximas al litoral manabita. XXX Seminario Nacional del Sector Eléctrico. Riobamba 15, 16 y 17 de abril de 2015, GT3.2 Mantenimiento en Sistemas de Transmisión.
- Yuvev, M. P. (2010). Elementos sustanciales del desarrollo local. Observatorio Iberoamericano del Desarrollo Local y la Economía Social (OIDLES), Revista OIDLES - Vol 4, N° 8 (junio 2010).

# Prospectiva del uso del suelo y cobertura vegetal en el ordenamiento territorial - Caso cantón Cuenca

Pinos Arévalo Nancy Jaqueline<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad de Cuenca, Facultad de Filosofía, Letras y Ciencias de la Educación.  
Consultora de ECOARQ, Libre Ejercicio.  
Cuenca/ Azuay/ Ecuador  
nancy.pinos@ucuenca.edu.ec, nancy.pinos@gmail.com

## RESUMEN

La planificación tradicional es básicamente retrospectiva, los objetivos que se persiguen son determinados por lo que sucede en el presente y han sucedido en el territorio donde se planifica. La prospectiva o construcción de escenarios, es un análisis para explorar un conjunto de alternativas respecto al futuro, ayudando a la sociedad a comprender cómo las acciones que hoy tomamos, pueden influir en el futuro de los territorios. Se plantea la construcción de escenarios territoriales, sobre la base del diagnóstico de la situación actual del cantón Cuenca, los modelos de cambio de uso del suelo son una herramienta para conocer las dinámicas en el sistema territorial, y ayudan a establecer los patrones de cambio de uso determinados por variables biofísicas, socioeconómicas y espaciales, explorar posibles escenarios y evaluar la influencia de políticas de uso de la tierra y modificarlas en beneficio de un ordenamiento territorial. El estudio aborda el análisis de los cambios de uso del suelo entre el periodo 1991 al 2001, así como la realización de modelos de simulación de usos del suelo a futuro (año 2010 y 2030) a través de imágenes satélites Landsat utilizando Tecnologías de Información Geográfica.

Palabras clave: **Análisis multitemporal, cambios de uso del suelo; dinámicas de cambio, ordenación del territorio, planificación.**

## ABSTRACT

*Traditional planning is basically retrospective, the objectives pursued are determined by what happens in the present and have happened in the territory where it is planned. The prospective or construction of scenarios is an analysis to explore a set of alternatives regarding the future, in which the society to help understand how the actions we take today can influence the future of the territories. The construction of territorial scenarios, through the diagnosis of the current situation of the canton Cuenca, land use change models are a tool to know the dynamics in the territorial system, help to establish the patterns of change of use determined by biophysical, socioeconomic and spatial variables, explore possible scenarios and assess the influence of policies of land use and modify the benefit of land use planning. This paper deals with the study and analysis of land use changes between the periods 1991 to 2001, and model of land use change (to the year 2010 and 2030) by Landsat satellite imagery using Geographic Information Technologies.*

**Keywords: Dynamic change analysis, land use change, multitemporal analysis, spatial planning.**

## I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el Ecuador ha experimentado fuertes cambios en su cobertura vegetal natural y de uso del suelo, el avance de la frontera agrícola, un acelerado y desordenado crecimiento de las áreas urbanas, la presión que éstas ejercen sobre el territorio, ha provocado que se sacrifiquen tierras con potencial agrícola, convirtiendo suelo rural en urbano, el desplazamiento de áreas de cultivos y ganaderas se desplacen en las laderas de las montañas o zonas menos fértiles, perdiendo la función social y ambiental del suelo.

Los cambios ecológicos y sociales han creado una crisis mundial, la variabilidad del clima, los cambios de uso del suelo tienen como consecuencia el agotamiento de la biodiversidad que ponen en cuestionamiento el manejo de los sistemas ecológicos y la acertada aplicación de las políticas en la gestión del territorio. Conocer la evolución de éstos sistemas naturales no es nada fácil, pero si se quiere un futuro sostenible, es necesario conocer cómo las actividades humanas afectan los ecosistemas, cómo afectan la disponibilidad de los recursos que estos ecosistemas proveen y la percepción y respuesta de la población hacia esta alteración de su entorno.

Las dinámicas de cambio de uso del suelo son complejas, ocasionando cambios inesperados en la estructura y funcionalidad del ambiente, y en consecuencia poniendo en riesgo la sostenibilidad de generaciones futuras.

La construcción de escenarios está íntimamente ligada al estudio del cambio climático y pérdida de biodiversidad o modelamiento territorial. En los últimos años este tipo de investigaciones han tomado relevancia no solo en el campo medio ambiental, sino como parte de la metodología en los planes de ordenamiento territorial.

La prospectiva permite realizar un conjunto de análisis con el objeto de explorar o predecir el futuro, el mismo que depende de la acción de sus habitantes, que pueden construir un futuro mejor tomando las decisiones correctas en el momento apropiado. En ordenamiento territorial, la prospectiva, constituye una fase intermedia, entre el diagnóstico y la propuesta, y se refiere a la predicción del futuro, mediante dos vías: la proyección de la tendencia y la construcción de escenarios o imágenes futuras; se denomina escenario, a la descripción de una situación territorial futura y el encadenamiento coherente de sucesos que, partiendo de la situación actual, llega a la futura (Gómez Orea, 2008).

Los procesos de Ordenamiento Territorial, utilizan conceptos y metodologías en la construcción de la prospectiva, como visiones alternativas de futuros deseados, escenarios alternativos de futuros posibles y métodos para transformar los deseos y conocimientos objetivos que sirvan para guiar las actuaciones. Requiere de una capacidad creativa, concertación y un profundo conocimiento de los resultados del diagnóstico y las diferentes variables que influyen en él.

La prospectiva, o construcción de escenarios, es el simulacro de un determinado momento y el camino que lleva a un estado final, de ahí la importancia en los planes de ordenamiento territorial.

Existen varios planteamientos metodológicos para la construcción de escenarios, este estudio se centra en analizar los cambios en el uso de suelo, componente elemental y básico para la planificación, pues es ahí donde se realizan todas las actividades humanas, sujetas a la dinámica natural e inducida que sufre el territorio y donde se realiza el ordenamiento como tal.

El cantón Cuenca, es un territorio que está experimentando acelerados cambios de usos del suelo de una manera intensa y extensa en su espacio territorial. Así como en las parroquias rurales de Paccha, Sinincay, Sayausí, El Valle Ricaurte, se puede apreciar el crecimiento de zonas destinadas para vivienda, apertura de vías y el crecimiento de áreas productivas en las zonas de las laderas de montaña, disminuyendo las zonas de páramo y bosques naturales e incrementándose áreas de riesgo por deslizamientos o hundimientos. Por esta razón es necesario generar posibles escenarios que ayuden a establecer directrices para la toma de decisiones en una adecuada planificación territorial.

En esta investigación se realiza un estudio sobre el cambio del uso del suelo, visto como un sistema complejo. El objeto de este estudio es determinar relaciones dinámicas y modelar procesos de toma de decisiones con el fin de representar la dinámica territorial, y de esta manera contribuir al entendimiento del sistema y al posible planteamiento de políticas y soluciones que contrarresten los efectos negativos de la dinámica del cambio del uso.

El uso y cambio del suelo tiene una gran influencia sobre el desarrollo sostenible urbano. El desarrollo de la ciudad viene acompañado por innumerables cambios morfológicos y funcionales del uso del suelo y por dinámicas complejas de ocupación y competitividad.

### A. ZONA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica entre las coordenadas 672 264,126 N - 9 722 625,52 E y 719 142,103 N - 9 648 830,512 E; pertenece a la provincia del Azuay y se ubica en la Región Centro Sur de la República del Ecuador. Limita al norte con la provincia de Cañar, al sur con los cantones de San Fernando, Santa Isabel y Girón, al este con los cantones de Paute, Gualaceo y Sigsig, y al oeste con la provincia del Guayas. Comprende 375.443,11 hectáreas, y representa el 41% del territorio provincial y el 1,32% del nacional.

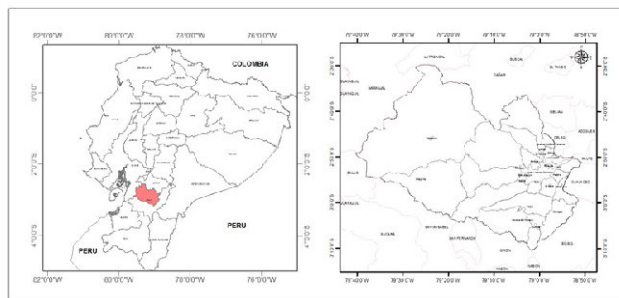


Figura 1. Ubicación geográfica del cantón

Políticamente, el cantón está formado por 15 parroquias urbanas y 21 rurales. Tiene un área urbana con una extensión de 6.923 hectáreas, y unas 368.520,11 hectáreas que corresponden al área rural.

El territorio se caracteriza por una gran heterogeneidad ambiental, debida a su accidentada topografía, definiendo una variedad de paisajes diversos y complejos, se encuentra el Parque Nacional El Cajas y el Área Nacional de Recreación Quimsacocha que comprende 29.389 ha y 3.204,3 ha respectivamente; y que representan el 9% del territorio, las áreas y bosques protectores cubren el 47% del territorio; con 4 cuencas hidrográficas, la del Santiago (52,4%), Jubones (0,23%), Naranjal-Pagua (26,4%) y Cañar (21%).



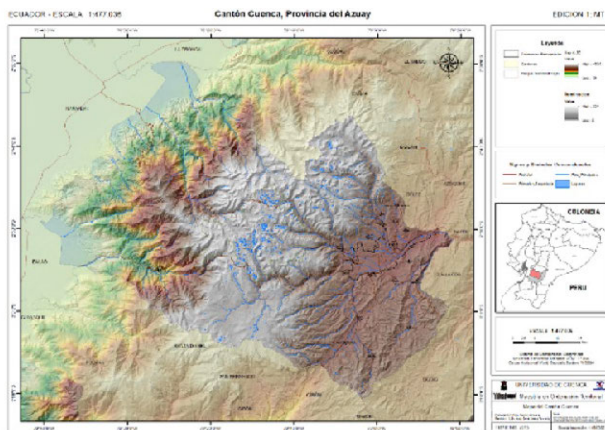


Figura 2: Mapa base del cantón Cuenca

Para el año 2010, Cuenca tenía una población de 505.585 habitantes, de los cuales el 98% se ubica en el valle de la vertiente de la cordillera andina oriental y el 65% se concentra en la Ciudad de Cuenca.

El crecimiento demográfico que tuvo la ciudad de Cuenca a inicios de la colonia hasta mediados del siglo XX fue bastante lento, en 1950 se realiza el primer censo en el cual se determina que la ciudad tenía 50 mil habitantes comparados con los 35 mil contabilizados en 1885, dando un crecimiento del 4% anual (Mejía, V. 2014).

**TABLA I**  
EVOLUCIÓN DE LA POBLACIÓN Y DENSIDAD DE CUENCA, 1950-2010.

AÑO	POBLACIÓN	SUPERFICIE HECTÁREAS	DENSIDAD HAB / HA
1950	52.696	850	62
1962	74.765	1.550	48
1974	104.470	2.500	42
1982	152.365	3.900	39
1990	198.390	5.300	37
2001	278.995	6.043	46
2010	331.888	7.059	47

La misma información la podemos observar en la figura No. 3.

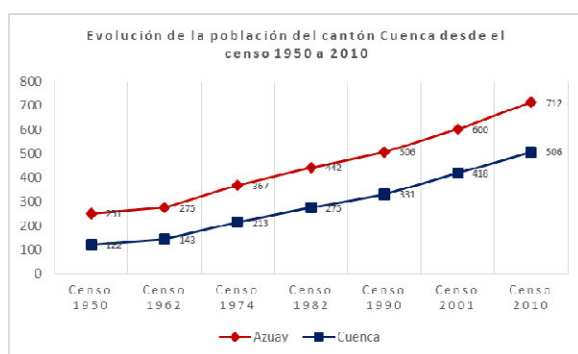


Figura 3. Evolución de la población del cantón Cuenca

El territorio ha experimentado gran presión por el uso del suelo en los últimos cuarenta años, como ha ocurrido en el resto del país. Se observan distintas tendencias en el uso del suelo relacionadas con la agricultura y la ganadería que además de responder a las condiciones ambientales, obedecen a la influencia de las actividades económicas de las áreas circundantes, si analizamos el cambio de uso del suelo a nivel nacional podemos observar que este se centra en la pérdida

de vegetación boscosa por otro tipo de cobertura, dando un valor de 200.000 ha/año (MAE, 2007)

El acelerado crecimiento desordenado que se ha dado en los últimos 20 años en zonas circundantes al área urbana, ha provocado la disminución de los suelos productivos del cantón, los mismos que han soportado una fuerte presión por fraccionamiento, reduciendo el área con potencial productivo y que trae implicaciones en la economía de la población y del cantón. La dotación de servicios básicos se vuelve más complicada e incrementa los valores de inversión por parte de las entidades públicas que tienen a cargo estos servicios, de igual manera la pérdida de zonas boscosas que favorecían la protección ante diferentes amenazas naturales han sido reemplazadas por viviendas dispersas y actividades agrícolas y una ganadería de subsistencia en la gran parte del territorio cantonal.

Al año 2010, el 26% del territorio presente una cobertura natural y el 52% a uso agro productivo y el 21% a zonas urbanas, información generada con imágenes RapidEye de 2010. Según el Estudio del Banco Interamericano de Desarrollo - BID, realizado en 2014, en el área de influencia inmediata a la ciudad de Cuenca, indica que sólo el área urbana ha crecido 120 hectáreas aproximadamente en los últimos 50 años (Informe Final del Estudio CE 3 Crecimiento urbano en la ciudad de Cuenca, 2014).

En el análisis multitemporal que realizan entre los años 1987, 2002 y 2010, demuestran una disminución del 30% de la cobertura vegetal en un periodo de 23 años, que a la vez éstas mismas incrementan en un 29,69% de las zonas urbanas y dispersas. De acuerdo a este estudio se concluye que el incremento del suelo urbano, es del 155% y corresponde a zona residencial y un incremento del 600% de suelo industrial.

El Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial cantonal analiza la cobertura vegetal y uso del suelo entre los años 2000 y 2013, información proporcionada por el Ministerio del Ambiente, en el cual se puede observar la disminución de áreas naturales y el incremento de suelos con usos agrícolas, pecuarios y urbanos, dando un 18,24% de cambio en su cobertura en un periodo de 13 años.

## II. MÉTODO

Se realizó la recopilación de información cartográfica base a las cartas topográficas 1:50.000 publicadas por el Instituto Geográfico Militar - IGM; cartografía generada en el proceso de elaboración del Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial 2011 y 2015 del Municipio de Cuenca.

Se contó con imágenes satélites descargadas del Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS por sus siglas en inglés (United States Geological Survey), correspondientes al sensor Landsat 5 y 7, de los años 1991 y 2001 respectivamente. A estas imágenes se les realizó un procesamiento digital con el objetivo de contar con las características adecuadas para los diferentes análisis.

Para el análisis multitemporal se empleó modelos de simulación (Automatas celulares de cadenas de Markov CA\_MARKOV y el Land Change Modeler -LCM), en base al análisis histórico o multitemporal (cadenas de Markov), en la cobertura y uso del suelo del cantón. Para el modelo de aptitud se usó el método de Evaluación Multicriterio - EMC y luego una Evaluación Multi-Objetivo - EMO con la técnica de Suma Lineal Ponderada - SLP y Análisis del Punto Ideal - API. Este último método requiere la definición de objetivos para determinar la aptitud del suelo en conservación, agrícola, pecuaria, forestal

y urbano, cada uno de estos debe tener criterios en base a los factores que posibilitan su aptitud y también se identificaron algunas restricciones tanto morfológicas como ecosistémicas.

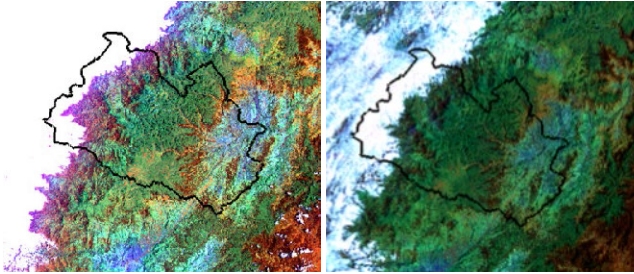


Figura 4: Imágenes de Satélite Landsat usadas para la investigación. a: Imagen Satélite Landsat5, P10R62, capturada el 15 de octubre de 1991. b: Satélite Landsat7, P10R62, capturada el 3 de noviembre de 2001

Los escenarios a futuro generados, demuestran la misma tendencia de cambio de uso del suelo. La probabilidad de cambio de las categorías con vegetación natural a uso productivo es mayor al 60%, es decir que la tendencia es la misma, igual sucede con el uso urbano viéndose un posible incremento de su área dentro del territorio cantonal.

De acuerdo a la evaluación multicriterio - EMC, se construyó un modelo de aptitud de suelo para zonas de conservación, agrícola, pecuaria, forestal y urbana. En la cual se determinaron los factores que posibilitan esta aptitud territorial para cada nivel de uso.

Entre ellos se estableció; uso del suelo actual, pendientes, clases agrológicas, distancia a vías, distancia a la red de agua potable y alcantarillado. Seguido de eso se elaboró una matriz de evaluación de cada uno de los factores o criterios y luego una matriz de puntuación o pesos. De esta manera se define las condiciones que favorecen a cada uno de los niveles de uso establecidos.

Luego se aplicó la técnica de Saaty, que no es más que la ponderación por pesos a cada uno de los niveles de uso y finalmente se aplicó la técnica de Suma Lineal Ponderada -SLP; esta técnica realiza una suma de los resultados de cada uno de los factores ya ponderados y jerarquizados y determina espacialmente las áreas que cumplen estas condiciones previamente establecidas.

La técnica de Análisis de Punto Ideal - API, que se base en el cálculo de la distancia desde cada alternativa al punto ideal. Las más cercanas son las más aptas, mientras que las más distantes serán las más desfavorables para ese nivel de uso.

A cada uno de estos se aplican las restricciones o limitaciones territoriales y así establecemos un modelo óptimo para la ordenación de las actividades en el territorio cantonal.

### III. RESULTADOS

#### A. COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO 1991 Y 2001

Para el año 1991, se observa la categoría de páramo con 35,6% con mayor dominancia, seguido de un 19,5% de vegetación herbácea, un 11,5% de vegetación leñosa nativa, el 6,5% de vegetación leñosa, la categoría de pastos y cultivos presenta un 6,2% y el suelo urbano un 0,4%.

En las figuras 5 y 6 se muestran los mapas de usos del suelo obtenidos de los años 1991 y 2001 respectivamente y que serán la base para el análisis de cambio de uso del cantón.

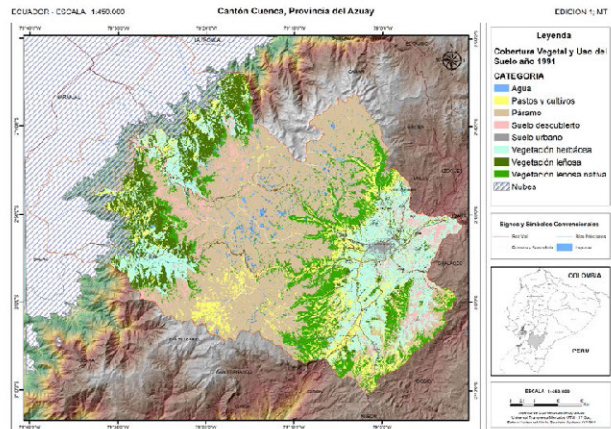


Figura 5: Mapa de la cobertura y uso del suelo al año 1991

La cobertura vegetal del año 2001 presenta un 32,8% de páramo, seguido de pastos y cultivos con el 19,3%; vegetación herbácea con un 13,2%; vegetación leñosa nativa con un 8,3% y vegetación leñosa con el 5,3%, el suelo urbano tiene un porcentaje del 0,6%.

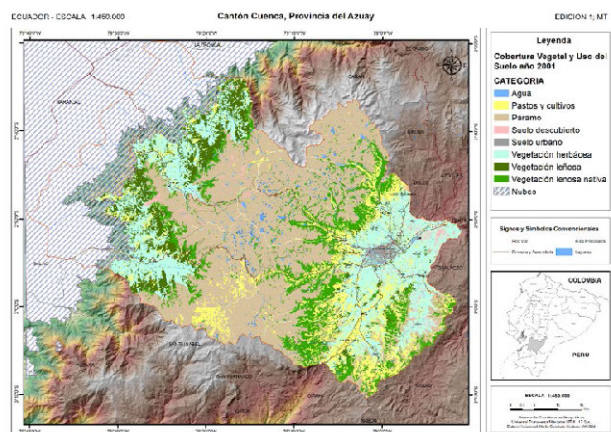


Figura 6: Mapa de la cobertura y uso del suelo al año 2001

#### B. CAMBIOS OCURRIDOS SOBRE LA COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO ENTRE EL PERIODO 1991 AL 2001

Durante el periodo de análisis (1991 - 2001), se ha evidenciado una creciente transformación sobre la cobertura vegetal, estos procesos han dado paso a la transformación principalmente de áreas cubiertas por vegetación natural hacia usos antrópicos. En tabla No. 2 se muestra un resumen de los cambios entre el uso del suelo en el año 1991 y 2001 por categoría y expresados en porcentajes-

Podemos observar que el 35,6% de territorio del cantón Cuenca corresponde al ecosistema páramo, áreas dedicadas a la conservación; la vegetación herbácea presenta un 19,5% y pertenece a vegetación pionera en la franja montañosa ubicada alrededor de la ciudad; la vegetación leñosa nativa con el 11,5% incluye los bosque altoandinos, que a diferencia de la vegetación leñosa que corresponde a arbustos, matorrales o chaparro que se ubica en las estribaciones de la cordillera occidental; el área de pastos y cultivos que incluyen parcelas de cultivos de ciclo corto y anuales, también se encuentran en esta categoría zonas de pasto; el área urbana con un 0,4% del total cantonal, el 18,9% restante corresponde a la cobertura de nubes.

Para el año 2001 la superficie de páramo se ha reducido a un 32,8%, la misma tendencia presenta la vegetación leñosa nativa con 8,3%, vegetación leñosa con el 5,3%,

La categoría de pastos y cultivos presenta un incremento al 19,3% al igual que el suelo urbano al 0,3%

Se puede observar el crecimiento de la categoría de pastos y cultivos casi se ha triplicado en un periodo de 10 años; presentando unas 47 mil hectáreas de cambio de uso; el decrecimiento de las categorías correspondientes a coberturas naturales como vegetación leñosa y herbácea con un total de 49 mil hectáreas que evidencian el proceso de transición a otras coberturas; y un crecimiento del área urbana con una 724 hectáreas.

La estimación de la tasa anual de cambio se calculó a partir de la superficie de cada categoría, aplicando la fórmula descrita anteriormente; expresa la mayor o menor intensidad de las dinámicas de cambio en las coberturas de suelo en el cantón entre el periodo de los años 1991 y 2001, se observa que la categoría de vegetación herbácea es la más alta con un valor negativo de -3,8%, seguida de vegetación leñosa nativa con -3,2%, vegetación leñosa con -1,9%.

**TABLA II**  
TASA DE CAMBIO POR COBERTURA EN EL CANTÓN CUENCA ENTRE 1991 Y 2001

n=10 años	S1 (Año 1991)	S2 (Año 2001)	S (%)
<b>COBERTURA</b>	<b>SUPERFICIE (%)</b>	<b>SUPERFICIE (%)</b>	<b>TASA ANUAL CAMBIO</b>
Agua	0,6%	0,6%	0,2%
Pastos y cultivos	6,2%	19,3%	12,0%
Páramo	35,6%	32,8%	-0,8%
Suelo descubierto	0,9%	1,0%	1,3%
Vegetación leñosa	6,5%	5,3%	-1,9%
Vegetación herbácea	19,5%	13,2%	-3,8%
Vegetación leñosa nativa	11,5%	8,3%	-3,2%
Suelo urbano	0,4%	0,6%	4,0%
<b>TOTAL</b>	<b>100%</b>	<b>100%</b>	

La cobertura natural (páramo, vegetación leñosa y herbácea), presenta una pérdida de 49.066,3 hectáreas, que corresponden a -2% hectáreas por año; en el año 1991 tenían un total de 267.873,7 hectáreas, para el año 2001 se reducen a 218.807,4 hectáreas, lo que nos indica que la mayoría de cambios se presenta en estas coberturas.

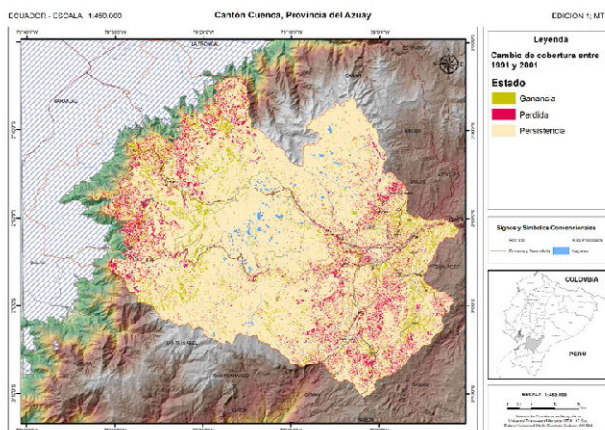


Figura 7: Ganancias, Pérdidas y Persistencia de las categorías de uso del suelo

La categoría de pasto y cultivos es la que mayor crecimiento presenta, en 1991 con 22.796,1 ha y para el año 2001 se incrementa a 70.639,8 ha, dando una tasa de cambio del 12% anual, es decir que la transición se dio a esta cobertura.

Las categorías de cobertura de suelo no vegetal, es decir, agua, suelo descubierto y suelo urbano, presentaban para 1991 un total de 6.877,8 ha y en el 2001 presenta 8.100 ha, con una tasa de cambio del 1,6% anual.

**C. MODELO PROSPECTIVO DE LA COBERTURA VEGETAL PARA EL AÑO 2010 Y 2030**

Para la construcción del modelo al año 2010 se empleó los mapas de cobertura vegetal de las dos fechas analizadas 1991 y 2001, prediciendo la probabilidad de cambio de uso del suelo que pueda ocurrir para el año determinado.

Para la construcción del modelo al año 2030 se consideraron variables físicas, bióticas y sociales como áreas protegidas, accesos viales, cobertura de servicios, aptitud del suelo y otros más. Con este mapa de restricciones se pretendió determinar las nuevas condiciones de uso y de probabilidad de cambio en el territorio hacia el año 2030.

**D. APTITUD DEL SUELO**

Previo a la construcción de los escenarios, es necesario la obtención del mapa de aptitud del suelo, el mismo que sirve como insumo para la confección de los mapas de la prospectiva territorial.

Para ello fue necesario definir variables, criterios y factores, a los cuales se procedió a aplicar matrices para su valoración. Se definió cinco tipos de aptitud de suelo: conservación, agrícola, pecuaria, forestal y urbana.

Para el territorio cantonal se han establecido cinco niveles de uso (Gómez 2013): conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano. En cada nivel de uso se determinan unos factores que mejor condición presentan para un determinado uso.

**TABLA NO. III**  
CRITERIOS FACTORES PARA USO DE CONSERVACIÓN, AGRÍCOLA, PECUARIO, FORESTAL.

CRITERIO	FACTORES			
	Conservación	Agrícola	Pecuario	Forestal
Cobertura vegetal y uso del suelo	Zonas ambientalmente sensibles	Zonas de uso agrícola	Zonas de uso pecuario	Zonas de uso forestal
Topografía del terreno (Pendiente porcentaje)	Susceptibilidad a la erosión	Condiciones favorables para actividades agrícolas	Condiciones favorables para actividades pecuarias	Condiciones favorables para actividades forestales
Clases agro-lógicas	Aptitud de conservación	Aptitud para actividades agrícolas	Aptitud para actividades pecuarias	Aptitud para actividades forestales
Altitud	Preservación de ecosistemas			

Se utilizaron matrices de ponderación de los factores para ser utilizados con los respectivos modelos para la determinación de la aptitud de uso del suelo, aplicando métodos multicriterio y técnicas de la Suma Lineal Ponderada (SLP) y Análisis del Punto Ideal (API)

**TABLA NO. IV**  
CRITERIOS: FACTORES PARA USO URBANO

CRITERIO	FACTOR
Cobertura vegetal y uso del suelo	Zonas adecuadas para uso urbano
Topografía del terreno (Pendiente porcentaje)	Aptitud de asentamientos humanos en pendientes inferiores al 30%
Proximidad a carreteras	Accesibilidad
Proximidad a asentamientos humanos	Expansión urbana
Proximidad a servicio de agua potable	Dotación de servicio de agua potable
Proximidad a servicio de alcantarillado	Eliminación de aguas residuales

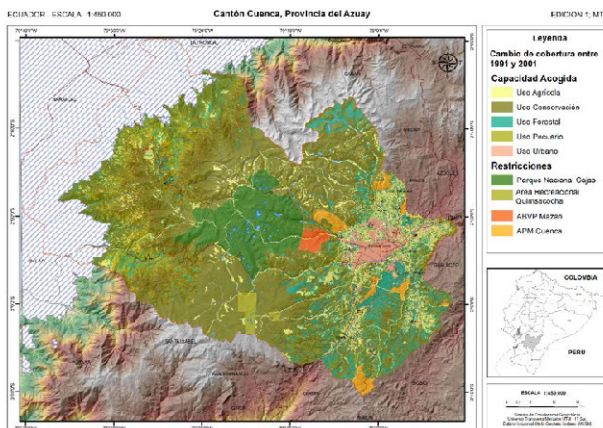


Figura 8: Aptitud del uso del suelo en conservación, agrícola, pecuario, forestal y urbano, aplicando la técnica EMO - Análisis del Punto Ideal - API.

### E. PROSPECTIVA DEL USO DEL SUELO

De acuerdo a la metodología aplicada, se observó que la tendencia de cambio de uso del suelo se mantiene. La cobertura de páramos continúa su tendencia de cambio a cobertura sin vegetación. La cobertura de pastos y cultivos permanecen en crecimiento incorporando áreas de páramo y vegetación leñosa y herbácea. Se puede observar que el tendencial al 2030 enuncia la intervención en zonas de protección a pesar de las restricciones con las que el territorio cuenta, el área urbana tiene un avance en pequeñas zonas donde se podría suponer de una consolidación, pero hay que considerar la categoría de pastos y cultivos viene acompañada de una vivienda aislada y ésta categoría tiene el mayor crecimiento dentro del escenario próximo.

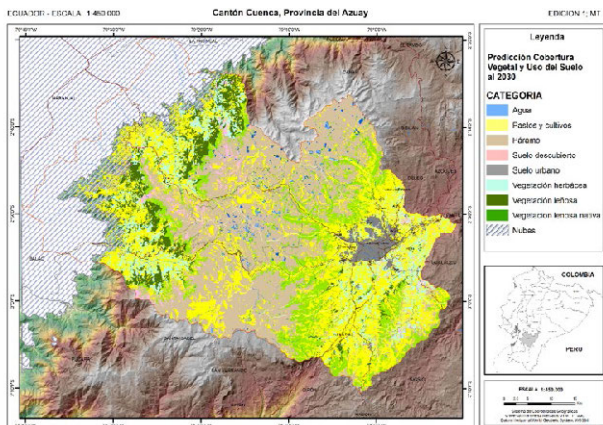


Figura 9: Modelo predictivo al año 2030 del cambio de uso del suelo del cantón Cuenca

La información base para la construcción de escenarios futuros parten de los análisis históricos, el uso de las cadenas de markov y autómatas celulares, son las más adecuadas para la construcción de escenarios de tendencia, en ambos se visibiliza procesos de deforestación, acelerado crecimiento urbano y el incremento de áreas para uso agrícola y ganadero, generando las incompatibilidades en la aptitud del territorio cantonal.

En la siguiente ilustración se observa como es la tendencia de cambio en los modelos predictivos generados para el cantón.

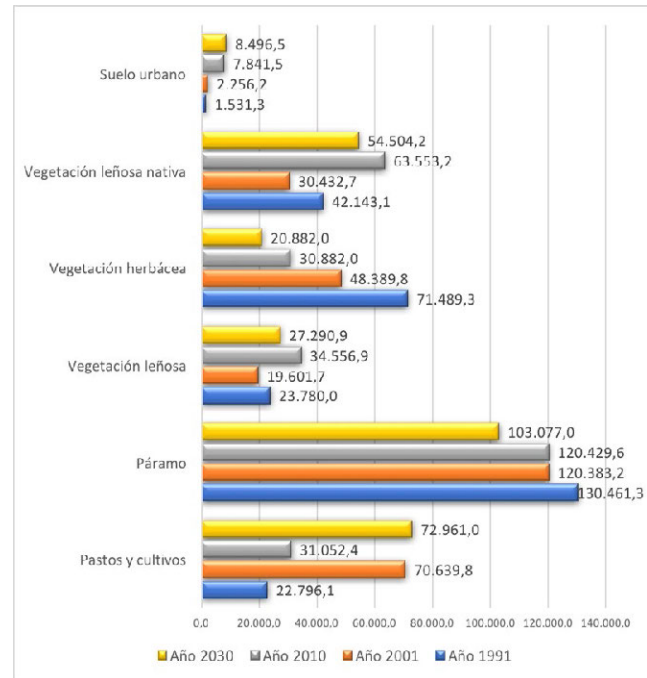


Figura 10: Dinámica de cambio de superficie en las categorías de uso del suelo en 1991, 2001, 2010 y 2030

### IV. CONCLUSIONES

Este trabajo ha permitido demostrar la evolución del cantón Cuenca en relación con los cambios de uso de suelo que han sucedido durante el periodo 1991 y 2001, así también la tendencia de cambio hacia el año horizonte 2030.

El cantón Cuenca ha experimentado numerosos cambios en todo su territorio de forma intensa y asociados a la apertura de una red vial en muchos de los casos sin planificación. Esto se puede evidenciar al observar que la cobertura natural (páramo, vegetación leñosa y herbácea), presenta una pérdida de 49.066,3 hectáreas, entre el periodo 1991 - 2001; mientras que la categoría de pastos y cultivos tiene un incremento de 70.639 hectáreas en este mismo periodo.

Del análisis de los resultados en la estimación de la tasa anual de cambio de uso del suelo se observa que en entre el periodo 1991 y 2001, la vegetación herbácea es la más afectada por el cambio, seguida por la vegetación leñosa nativa y la vegetación leñosa. Todas con porcentajes negativos, es decir, son las categorías que más presión sufren para el proceso de cambio de uso del suelo. La categoría de pasto y cultivos es la de mayor crecimiento entre este periodo, incrementando de manera considerable su porcentaje de cambio.

La matriz de tabulación cruzada nos permite observar las categorías de uso del suelo que han manifestado cambio y hacia

que categorías han transicionado, así como la persistencia que han experimentado, tanto en hectáreas como en porcentajes con respecto al total.

El mapa de probabilidad hacia el año 2030 muestra la tendencia de cambio que se ha venido dando en el territorio, el crecimiento urbano y agroproduktivo sigue presionando sobre coberturas naturales, sin importar las restricciones o aptitudes que presenta el territorio. La disminución de categorías de suelo como vegetación herbácea, arbustiva y su cambio a categorías de pastos y vivienda dispersa continúa de acuerdo a la proyección territorial.

Los análisis de dinámicas de cambio de uso del suelo son complejos, las variables que interactúan en esa relación son múltiples, y para entender cómo afecta a los recursos se deben conocer los procesos fundamentales en un contexto social, económico y espacial.

Las actividades del sector primario como la agricultura y ganadería tienen un proceso decreciente, lo que se puede evidenciar con la pérdida de tierras agroproduktivas que se transforman a zonas de tejido urbano discontinuo. Los espacios con vegetación arbustiva y/o herbácea son los que experimentan mayores cambios, con grandes pérdidas por el crecimiento de la mancha urbana continua y discontinua, la misma que no se consolida dentro de los límites establecidos como urbanos de acuerdo a la ordenanza actual. La promoción inmobiliaria crece en torno a los nuevos ejes viales de comunicación, debido a que el costo del suelo en estas áreas es mucho más bajo.

El crecimiento de esta mancha de tejido urbano discontinuo tiene un impacto directo sobre la biodiversidad del cantón,

ya que ocasiona la fragmentación de hábitats y la aparición de infraestructuras y de diferentes actividades cerca de áreas con alto valor ambiental y por ende la sobre explotación de los recursos naturales.

A pesar de todo ello, el cantón Cuenca, sigue conservando un importante porcentaje de coberturas naturales, bajo diversas figuras de protección, el reto que tienen los gestores territoriales es asegurar la eficacia de las normativas vigentes y la creación de nuevas que sean capaces de proteger esta red ecológica de gran importancia para el aprovechamiento de servicios ambientales para el cantón.

Es prioritario corregir las deficiencias causadas durante décadas pasadas por la falta de una correcta aplicación de la normativa tanto en materia de ordenamiento urbano como ambiental, es necesario dar solución a los problemas generados por errores cometidos en el Ordenamiento Territorial o a la falta de éste en algunos sectores. Apostar por un desarrollo que respete el medio natural.

No hay que olvidar que la vocación territorial del cantón es la conservación ambiental, por contar aún con grandes extensiones de zonas de páramo y vegetación leñosa que se ubican en la zona alta del territorio. Cuando las simulaciones de uso del suelo se corren en el límite máximo del horizonte temporal (2030), el comportamiento es el tendencial, es decir, crecimiento del tejido urbano discontinuo, desplazamiento de áreas agroproduktivas a zonas más altas y disminución de coberturas naturales.

## AGRADECIMIENTOS

Trabajo realizado como tema de investigación en la Maestría en Ordenación Territorial por la Universidad de Cuenca, la autora reconoce las contribuciones al Magister Boris Vélez, director de esta tesis de investigación.

## REFERENCIAS

- Barredo Cano, J. I. (1996): *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio*. Madrid, Ed. RA-MA.
- Baquero, F.; Sierra, R.; L. Ordóñez, M. Tipán, L. Espinoza, M. B. Ribera y P. Soria. (2004). "La Vegetación de los Andes del Ecuador. Memoria explicativa de los mapas de vegetación: potencial y remanente a escala 1:250.000 y del modelamiento predictivo con especies indicadoras". EcoCiencia / CESLA / Corporación EcoPar / M AG SIGAGRO / CDC - Jatun Sacha / División Geográfica - I G M. Quito.
- Buzai, G.D., Baxendale, C.A., 2006. *Análisis Socioespacial con Sistemas de Información Geográfica*. Editorial GENEPA. Buenos Aires, Argentina. 397 pp.
- Buzai, G.D. (2007). Actualización de cálculos y distribuciones espaciales a través de cadenas de Markov y autómatas celulares: Pérdida de suelos en el área metropolitana de Buenos Aires - 2001. En: Matteucci, S.D. (Ed.) *Panorama de la Ecología de Paisajes en Argentina y Países Sudamericanos*. Ediciones INTA. Buenos Aires. pp. 433-450.
- Bosque, J. (2001). Planificación y gestión del territorio. De los SIG a los Sistemas de ayuda a la decisión espacial (SADE). *El Campo de las Ciencias y las Artes*, 138, 137-174.
- Camacho Olmedo, M.T., Molero Melgarejo, E. y Paegelow, M. (2010): Modelos geomáticos aplicados a la simulación de cambios de usos del suelo. Evaluación del potencial de cambio. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 658-678. ISBN: 978-84-472-1294-1.
- Cárdena s, A., (2005), "Prognosis espacial y análisis multitemporal de cambio de cobertura vegetal y uso del suelo del cantón Baños (1991 - 2004), Tasas de cambio", EcoCiencia, Quito, Ecuador, 2005.
- Clavero, I., Santos, M., Navarro, R., Guerrero, J.J., Cáceres, F. Moreira, J.M. (2010): Implementación de un sistema de escenarios futuros sobre el mapa de usos de suelo de Andalucía. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Pp. 759-776. ISBN: 978-84-472-1294-1.
- GADM Cuenca, (2011). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Cuenca*. Cuenca, Ecuador.

- Chuvieco Salinero, E. (2007): Teledetección Ambiental. Barcelona, Ariel Ciencia, 3ª Edición.
- Chuvieco, E. (2000): Fundamentos de Teledetección Espacial, 3ra. Edición revisada. Madrid. RIALPI Ciencia, 568 pág.
- Chuvieco, E. (2007): Teledetección Ambiental, La Observación de la Tierra desde el espacio, 3ra. Edición. Madrid. Ariel Ciencia, 586 pág.
- Gallardo Beltrán, M. (2014). Cambios de usos de suelo y simulación de escenarios en la Comunidad de Madrid. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. Facultad de Geografía e Historia. Departamento de Geografía Humana.
- Gómez Delgado, M. y Barredo Cano, J. I. (2005). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio aplicados al ordenamiento del territorio. Paracuellos de Jarama, Editorial Ra-Ma, 2º Edición.
- Gómez Orea, D., Gómez Villarino, A. (2013). Ordenación del Territorio. Madrid. Ed. Mundi Prensa. 3º Edición.
- Glosario, Sistemas y análisis de la información geográfica, manual de autoaprendizaje con ArcGIS, RA-MA Editorial, Madrid, 2006, Pág. 884
- Mejía, V. (2014). El Proceso de urbanización en Cuenca, Ecuador. Tesis Master Universitario en Gestión, Valoración Urbana. Universidad Politécnica de Cataluña. 88 pág.
- Moreno Jiménez. (2006). Sistemas y análisis de la información geográfica, manual de autoaprendizaje con ArcGIS, RAMA Editorial, Madrid, Pág. 4
- Moreno Santillan, R. (2013). Calculo de la tasa de deforestación anual en el periodo 2001-2011 en la provincia de Tambopata con imágenes de NDVI (MODI3) DE MODIS, mediante relación de ajuste de recta. Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 13 a 18 de abril de 2013, INPE
- Paegelow, M., Camacho Olmedo, M. T. y Menor Toribio, J. (2003): Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje, GeoFocus (Artículos), nº 3, 2003, p. 22-44. ISSN: 1578-5157.
- Pinilla, C. (1995): Elementos de Teledetección. Madrid. RAMA, 313 pág.
- Rubio Blanco, D. (2012). Tesis Doctoral: Diseño de un modelo metodológico para la fase de prospectiva en los estudios de ordenamiento territorial y su aplicación a algunos casos centroamericanos. Departamento de Proyectos y Planificación Rural. Escuela Técnica superior de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Ruiz, V., Savé, R., Herrera, A. 2013. Análisis multitemporal del cambio de uso del suelo, en el Paisaje Terrestre Protegido Miraflores Moropotente Nicaragua, 1993 - 2011. Ecosistemas 22(3):117-123. Doi.: 10.7818/ECOS.2013.22-3.16.
- Universidad Santiago de Compostela. Curso de Doctorado. Análisis Territorial. Planificación de usos del suelo. URL: [http://laborate.usc.es/files/analisis-territorial-planificacion-usos-de-suelo-apuntes-curso-doctorado.pdf]
- Universidad Santiago de Compostela. (2014). Practica 1: Aplicación de regresión logística, Cadenas de Markov y autó-mata celular para la simulación del cambio de uso del suelo. Convenio ECUIDTI - MASTERRA.
- Universidad Santiago de Compostela. (2014). Practica 3: Evaluación de la aptitud de la tierra para usos específicos mediante técnicas de evaluación multicriterio. Convenio ECUIDTI - MASTERRA.
- Universidad Santiago de Compostela. (2014). Practica 4: Diseño de mapas de usos del suelo mediante evaluación multicriterio y algoritmos de optimización espacial. Convenio ECUIDTI - MASTERRA.
- Tello, E., R. Garrabou, X. Cussó y J. Olarieta. (2008). Una interpretación de los cambios de uso del suelo desde el punto de vista del metabolismo social agrario. La comarca catalana del Vallés, 1853-2004. Revista Iberoamericana de Economía Ecológica 7: 97-115.
- Sarría Pablo, Y., Becerra Lois, F., (2006). Un estudio prospectivo aplicado al ordenamiento del territorio de la provincia Cienfuegos. Gestión Ambiental y Sostenibilidad. Revista Gestipolis. Online URL: [http://www.gestipolis.com/canales6/ger/estudio-de-ordenamiento-territorial.htm]

# Métodos de registros en fincas agropecuarias en la Región Huetar Norte de Costa Rica

Álvarez-Garay, Benjamín<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Cátedra Sistemas de Información Geográfica / Escuela Ciencias Exactas y Naturales / Universidad Estatal a Distancia  
Mercedes, Montes de Oca / San José / Costa Rica  
balvarez@uned.ac.cr

## RESUMEN

La Región Huetar Norte, ubicada al norte de Costa Rica, con una extensión de 718851 hectáreas (719 km<sup>2</sup>) y compuesta por los cantones Upala, Los Chiles, Guatuso, San Carlos y Zarcero; se dedica a la ganadería, agricultura y cultivos permanentes (caña de azúcar, piña, yuca y cítricos), ha tenido cambios notorios en el uso del suelo: cantones poblados (parte sur), cantones con agricultura, ganadería y migración (parte norte) y cantones turísticos (de aventura, rural y agrario).

Realizar una recopilación de los procesos de registros en fincas agropecuarias en la Región Huetar Norte, para el análisis de la información recolectada y las variables tomadas en cuenta para el registro de la finca agropecuaria.

La investigación es de tipo descriptivo-explicativo, ya que detalla la situación del registro de fincas agropecuarias en la región Huetar Norte. Se desarrollaron tres actividades i) identificación de instituciones y organismos que registran información, ii) búsqueda de información, instrumentos y variables utilizados para el registro y iii) bibliografía sobre los procesos de registro.

Cinco instancias participan en el registro de información en fincas agropecuarias: i) censos agropecuarios, ii) instituciones gubernamentales, iii) Centro Agrícola Cantonal, iv) Colegios Técnicos y Profesionales y v) organizaciones regionales. Cada instancia posee un objetivo específico, sin embargo, no siempre esa información es conocida por los agricultores.

Los registros de información son instrumentos para la toma de decisiones en diversos sectores, su utilidad se ve reflejada en datos que se emplean para conformar política local, regional y nacional.

Palabras clave: **Finca agropecuaria, registro, región uetar Norte, geografía, SIG.**

## ABSTRACT

*The Región Huetar Norte, located to the north of Costa Rica, with an extension of 718851 hectares (719 km<sup>2</sup>) and composed by the cantons Upala, Los Chiles, Guatuso, San Carlos and Zarcero; Is dedicated to cattle raising, agriculture and permanent crops (sugar cane, pineapple, yucca and citrus). It has had notable changes in land use: populated cantons*

(southern part), cantons with agriculture, cattle raising and migration (northern part) and tourist cantons (adventure, rural and agrarian).

To carry out a compilation of the processes of records in agricultural farms in the Región Huetar Norte, for the analysis of the information collected and the variables considered for the registration of the agricultural property.

The research is descriptive-explanatory, as it details the situation of the register of agricultural farms in the Región Huetar Norte. Three activities were carried out: i) identification of institutions and organizations that register information; ii) search for information; instruments and variables used for registration; and iii) bibliography on registration processes.

Five instances are involved in the registration of information on agricultural holdings: (i) agricultural censuses, (ii) government institutions, (iii) Cantonal Agricultural Center, (iv) technical and professional colleges, and (v) regional organizations. Each instance has a specific objective; however, this information is not always known by farmers.

Information records are instruments for decision-making in various sectors, their usefulness is reflected in data used to shape local, regional and national politics.

**Keywords:** Agricultural farm, Registry, Región Huetar Norte, Geography, GIS.

## I. INTRODUCCIÓN

La Región Huetar Norte, ubicada en la parte norte de Costa Rica, con una extensión territorial de 718851 hectáreas (719 km<sup>2</sup>) y compuesta por los cantones Upala, Los Chiles, Guatuso, San Carlos y Alfaro Ruiz; es una región productiva, dedicada a la ganadería, agricultura, cultivos permanentes (caña de azúcar, piña, yuca) y cítricos (Alvarado Salas, 2003; INEC, 2015b). En algunos sectores de la región el turismo es el eje económico principal (tal es el caso de la fortuna), siendo el turismo de aventura predominante, seguido del turismo agrario (entendido como aquel, donde el turista observa las actividades agrícolas presentes en el lugar y participa de ellas) y el turismo rural-comunitario (MIDEPLAN, 2014).

En los últimos 30 años, los cambios en el uso del suelo han sido notorios, ya que se observa cantones con concentración de población (ubicados al sur de la región) y cantones que basan su economía en agricultura, ganadería y migración (ubicados más al norte de la región). Lo cual genera en cierta medida fragmentación del bosque y pérdida en la biodiversidad (INEC, 2015a; SEPSA, 2013).

El principal problema que presenta la Región Huetar Norte en el sector agrícola, se debe al registro de la información enfocado en los pequeños y mediados productores. Aunque existe información en esta temática, la misma se encuentra desarticulada y distribuida en todas las instancias que participan en la región, situación que dificulta el análisis adecuado para identificar los impactos reales que generan las actividades socio-productivas sobre estos recursos en áreas geográficas específicas. Por consiguiente, también se ve obstaculizada la toma asertiva de decisiones para una mejor planificación del territorio.

Por tanto, se plantea realizar una recopilación de los procesos de registros en fincas agropecuarias en la Región Huetar Norte, con el fin de observar cual es la información recolectada, cuales instrumentos son utilizados y las variables tomadas en cuenta para los procesos de registros.

## II. MÉTODO

La investigación es de tipo descriptivo-explicativo, ya que detalla la situación del registro de fincas agropecuarias en la Región Huetar Norte. Para ello el trabajo se estructuró en tres actividades i) identificación de instituciones y organis-

mos que registran información agropecuaria, ii) búsqueda de información, instrumentos y variables utilizados para el registro de información agropecuaria y iii) bibliografía sobre los procesos de registro en la Región Huetar Norte.

La primera actividad se desarrolló con la ubicación de instituciones presentes en la Región Huetar Norte y la aplicación de una entrevista a actores claves, con el fin de conocer su experiencia en el registro de fincas agropecuarias. Para ello se realizó un inventario de las instituciones presentes en la región, posteriormente se visitó cada una de las instancias y en la medida de lo posible se tuvo la opinión mediante una entrevista de las personas que participaron en los procesos de registros de fincas agropecuarias en la región.

Para la segunda actividad se solicitó a las instancias que llevan registros de fincas agropecuarias en la zona, los registros de información. En este caso, se solicitó solamente el instrumento de registro y las variables que se recolectan, no así los datos que aportan las personas de las fincas agropecuarias. Esta actividad tenía como objetivo comparar los registros e instrumentos de recolección de información y las variables que son recolectadas en las fincas agropecuarias.

La última actividad correspondía a la búsqueda bibliográfica de registros en fincas agropecuarias. Tenía como objetivo conocer que se ha escrito y cuales instituciones se han preocupado por mantener un registro actualizado de la región y que reúna las variables adecuadas para ser replicadas en la región o en otras regiones de Costa Rica.

Este proceso fue desarrollado durante el año 2016, con el apoyo del Centro Investigación, Transferencia Tecnológica y Educación para el Desarrollo (CITTED) de la UNED instituciones públicas, organizaciones y productores.

## III. RESULTADOS

El registro de información agropecuaria es una actividad que se desarrolla en la Región Huetar Norte desde hace más de 50 años. Instituciones públicas, organizaciones no gubernamentales, sector educativo, productores y otros actores colaboran en el registro de información, sin embargo, este registro, cumple objetivos específicos para los diferentes actores, por tanto, el registro posee diferentes variables, se actualiza de acuerdo a los requerimientos de cada finca y en algunos casos no es socializado ya que posee datos sensibles de la finca o de la ac-



tividad agropecuaria como tal (Saborío, Carvajal, & Sánchez, 2014).

Para esta investigación se desarrolló el análisis de los registros de información en fincas agropecuarias con cinco instancias presentes en la Región Huetar Norte, que desarrollan registros, cada una de estas instancias poseen un objetivo y fin específico. En un gran porcentaje los datos recolectados por estas instancias son recopilados y archivados, en poca medida apoyan las políticas internas de cada institución u organización para generar información nacional, tal es el caso de los censos agrícolas.

### 1. CENSO AGROPECUARIO

Los censos agropecuarios son instrumentos que permiten actualizar información estructural agropecuaria de las fincas agropecuarias en un territorio dado, debe contemplar los cambios presentes en las fincas, la incorporación de tecnologías y las nuevas actividades en el sector. Este instrumento permite la localización de cultivos, formas de tenencia de la tierra, cambios en el paisaje, distribución espacial, sistemas de siembra utilizados y tecnología adecuada para el rendimiento del cultivo (FAO, 2007).

Tiene como objetivo fundamental suministrar al país la información básica, confiable y significativa, sobre la realidad agropecuaria, que permita fortalecer su capacidad técnica para formular planes, programas e instrumentos del desarrollo, estudios y análisis de políticas que tiendan al mejoramiento de la eficiencia y la eficacia en la conducción de uno de los sectores de mayor contribución a la economía nacional y al bienestar de la población (INEC, 2015b).

El ente oficial para desarrollar esta información es el Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), en conjunto con el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). En Costa Rica se han realizado seis censos agropecuarios a saber: 1950, 1955, 1963, 1973 1984 y 2014.

La información que se obtuvo para la Región Huetar Norte, corresponde al VI censo nacional agropecuario (CENAGRO). Este se desarrolló durante el periodo 2013 - 2014, contó con 78 profesionales y con una inversión estimada en 6 mil millones de colones (INEC, 2014b). Los datos recopilados corresponden a i) aspectos generales de la finca y el productor, ii) tenencia y uso de la tierra, iii) cultivos agrícolas, iv) ganado vacuno y porcino, v) actividades acuícolas y silvícolas, vi) empleo agropecuario, vii) maquinaria y equipo agrícola, viii) fertilizantes y plaguicidas, ix) prácticas de conservación al ambiente, x) presencia y tipo de riesgo, xi) roles de género y servicios de apoyo a la agricultura (INEC, 2014a).

Figura 1. Muestra del censo nacional agropecuario 2014. Fuente: INEC, 2014.

De acuerdo a los datos compilados por CENAGRO 2014, la Región Huetar Norte posee alrededor de 44 mil fincas agropecuarias distribuidas en 14 distritos, con un promedio de 30 hectáreas por finca y donde las principales actividades corresponden a ganado vacuno (42%), yuca (11%), frijol (7%), plátano (4,7%) y otras frutas (INEC, 2015a).

De acuerdo a la entrevista realizada con el coordinador de CENAGRO 2014, menciona que se trató de desarrollar la mayor cantidad de información para la región, sin embargo, se tuvo algunas áreas donde no se encontró a la persona encargada o dueña de la finca (pequeños productores), lo que dificultó tener datos de ese territorio, sin embargo, el censo se desarrolló, para toda la región Huetar Norte de Costa Rica.

Este instrumento (censo agropecuario) es de suma importancia, pues tiene como finalidad el desarrollo de política pública en materia agropecuaria, sin embargo, estos datos a nivel regional son poco socializados con todos los participantes; personas que tengan acceso a una red de comunicación (institucional o internet), pueden acceder a estos datos y compararlos con los números presentes en la región.

Sin embargo, se necesitan actividades como talleres o grupos focales que promuevan la socialización de los datos y así el análisis a nivel regional sea adecuado y las decisiones puedan ser acertadas para beneficio regional.

### 2. SECTOR AGROPECUARIO COSTARRICENSE

El sector agropecuario costarricense se creó mediante la ley 7064 y está integrada por i) el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), con sus instancias adscritas: Servicio Fitosanitario del Estado (SFE), Servicio Nacional de Salud Animal (SENASA) y Consejo Nacional de Clubes 4-S. (CONAC); ii) el Instituto de Desarrollo Rural (INDER), iii) el Consejo Nacional de Producción (CNP), iv) el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA), v) el Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA), vi) el Instituto Costarricense de Pesca y Acuicultura (INCOPECA), vii) la Oficina Nacional de Semillas (ONS), viii) el Programa Integral de Mercadeo Agropecuario (PIMA) y ix) el Foro Nacional Mixto y Foros Regionales Mixtos, conformados por representantes de organizaciones de pequeños y medianos productores del sector agropecuario (Poder Ejecutivo, 1992).

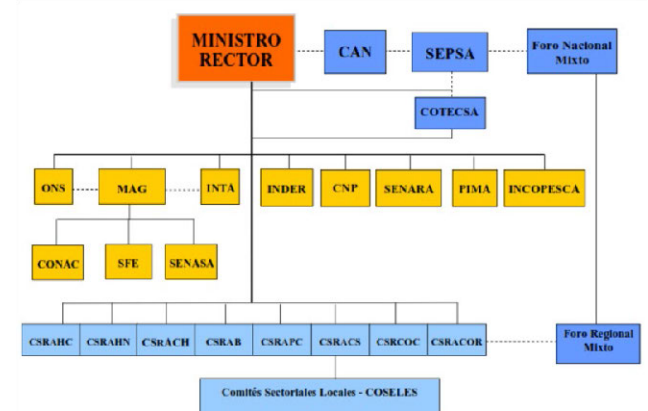


Figura 2: Sector de desarrollo agropecuario y rural. Fuente: SEPSA, 2014.

Estas instituciones e instancias dan soporte al agro nacional, cada una con diferentes objetivos y tareas. A partir del año 2014 se actualizó el documento de políticas para el sector agropecuario y el desarrollo de los territorios rurales, perio-

do 2015-2018, en el cual se tiene como fin impulsar el sector agropecuario y rural eficiente, competitivo, altamente capacitado en todos sus niveles, para contribuir con la seguridad y la soberanía alimentaria y nutricional, el posicionamiento internacional con calidad reconocida, respetuoso de los derechos de los trabajadores y las trabajadoras, cumplidor de la legislación vigente; comprometido con el medio ambiente y con responsabilidad social empresarial (Saborio et al., 2014).

La organización que recopila la información agropecuaria del sector agropecuario costarricense corresponde a la Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria (SEPSA), adscrita al Ministerio de Agricultura y Ganadería. Esta organización posee datos de agricultura y ganadería desde el año 1988 hasta la fecha (2017), donde presenta datos sobre i) área y producción, ii) precios, población y empleo, iii) créditos, iv) gasto público y v) comercio exterior.

**TABLA I**  
PRODUCCIÓN DE ARROZ EN TONELADAS SEGÚN CANTÓN, POR PERIODO AGRÍCOLA, 2012 / 2016.

REGIÓN	2012 / 2013	2014 / 2015	2015 / 2016
Huetar Norte	60 021	52 229	34 614
Guatuso	4 699	1 295	733
Los Chiles	5 739	4 330	3 651
San Carlos	2 520	2 698	718
Upala	47 063	43 906	29 511

Fuente: SEPSA, 2017.

SEPSA es una instancia de carácter sectorial, responsable de apoyar y asesorar al Ministro Rector (MAG), en la conducción eficaz y eficiente del desarrollo agropecuario nacional, la cual tiene como misión integrar y articular la acción de las instituciones del Sector Agropecuario y el Desarrollo Rural para el ejercicio de la rectoría, aportando insumos estratégicos propositivos, pertinentes, veraces y oportunos, para planificar, dar seguimiento y evaluar el desempeño del Sector (SEPSA, 2015).

De acuerdo a la entrevista suministrada por la persona encargada de llevar los registros, menciona que los datos colocados en los boletines, se realizan de manera nacional, regional y cantonal, es decir, son datos globales que dan una muestra de lo que se presenta en la región y el país.

Los datos a nivel distrital y de pequeños productores no se desarrollan en estos boletines, ya que cada institución participante en el sector agropecuario, debe de incluir personal y recursos para obtener la información a una escala grande y con mayor detalle.

Sin embargo, es de suma importancia la labor que realiza SEPSA en recopilar estos datos institucionales y unificarlos en un único boletín anual, ya que informa sobre actividad agropecuaria costarricense con datos y cifras regionales.

Además, provee información que puede ser compartida por cualquier persona u organización y analizada para la toma de decisiones en cualquier región de Costa Rica. Es importante considerar que SEPSA reúne toda la información nacional y regional de las nueve instancias participantes en el agro costarricense, con un formato fácil de leer y comprender, disponible al público, actualizado y con 30 años de información, lo que puede permitir la comparación en el tiempo de los diferentes cultivos.

### 3. CENTRO AGRÍCOLA CANTONAL

Los centros agrícolas cantonales (CAC), se crearon mediante la ley 4521y corresponden a organizaciones de productores,

sujetas al Derecho Privado, sin fines de lucro, con personalidad jurídica y patrimonio propio. Tienen como fin i) fomentar la participación de los productores y la población local para el mejoramiento de las actividades agropecuarias, agroforestales, pesqueras y de conservación de los recursos naturales y ii) garantizar a sus afiliados la libre adhesión, el retiro voluntario, el derecho a voz y el derecho a un voto por afiliado (República de Costa Rica, 1999a).

Tienen como objetivo fomentar la participación de los productores y la población local para el mejoramiento de las actividades agropecuarias, agroforestales, pesqueras y de conservación de los recursos naturales, así como para el ofrecimiento de la debida capacitación, créditos, transferencia tecnológica y otros beneficios que contribuyan para el desempeño de su actividad productiva (República de Costa Rica, 1999a).



Figura 3: Vista de la finca CAC San Carlos, 2016.

Fuente: Benjamín Álvarez Garay, 2016.

En la Región Huetar Norte se presentan cinco CAC (uno por cantón), los cuales tienen como fin impulsar la actividad agropecuaria en cada cantón de acuerdo a las actividades agropecuarias acordes a la zona. Estas organizaciones promueven el mejoramiento de la actividad agropecuaria por medio de actividades de investigación, capacitación y transferencia de tecnología.

El ingreso del productor al CAC se realiza de forma voluntaria y la persona puede retirarse cuando lo desee, tienen derecho a opinar sobre la estructura que posee el centro y de las actividades que desarrollan. El CAC se enfoca principalmente en desarrollar proyectos (o planes pilotos) productivos para agricultores del cantón, promover la capacitaciones en temas específicos enfocados en el agro local y la coordinación con las ferias del agricultor, las ventas de los productos de sus asociados (República de Costa Rica, 1999b).

Para el caso de registro de la finca, depende de la junta directiva de cada CAC y de las líneas propuestas en cada gestión, además de los proyectos productivos que promueve cada centro agrícola, esto quiere decir, que trabajan de forma independiente y se tiene un formato de registro de fincas establecido, sino de acuerdo a la demanda del mercado y de los productos propios de cada cantón.

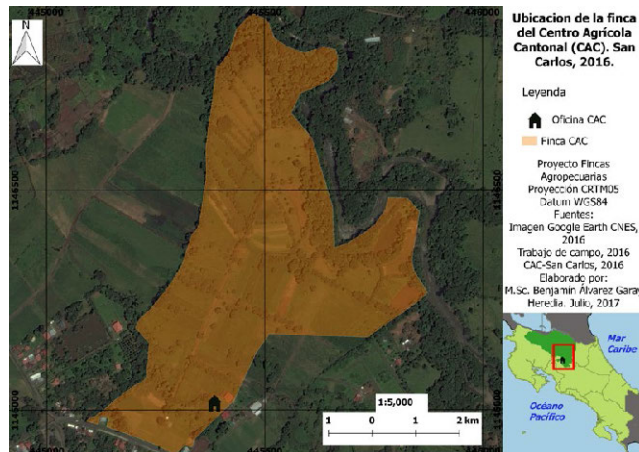


Figura 4: Ubicación del CAC San Carlos, 2017.

Fuente: Proyecto fincas agropecuarias en la Región Huetar Norte, 2016

Para el caso del CAC San Carlos, la finca se ubica en el poblado de Santa Clara (10 km al oeste de ciudad Quesada, centro poblacional principal), cuenta con parcelas demostrativas para investigación y educación, además de una lechería, maquinaria, galpones (pollos y gallinas) y zona de protección (cerca del río). Los productores socios pueden ver cómo se desarrolla una actividad agropecuaria y que tipo de manejo se presenta y además opciones de capacitación en temas específicos (manejo del suelo, lechería, galpones).

En gran medida los CAC pueden ser gestores de registros agropecuarios (de sus asociados y de las fincas), pues es una forma de validar recursos y datos presentes en el territorio. Claro está, que estas actividades deben ser parte del plan de trabajo de la junta directiva y de política del centro agrícola.

Una de las oportunidades de mejora para los CAC, sería el conocer mejor la finca de sus asociados, esto mediante el uso de programas en información espacial (SIG), generando planos actualizados, cultivos cosechados y posibles riesgos ambientales, esto para compartir la información con los asociados y así tomar acciones sobre los productos propios del cantón y las oportunidades que puedan desarrollar.

#### 4. COLEGIOS TÉCNICOS Y PROFESIONALES

La Educación Técnica Profesional se presenta como un sub-sistema del sistema educativo formal en Costa Rica y tiene origen mediante la Ley Fundamental de Educación número 2298, artículo 17, del 22 de noviembre de 1958 (Asamblea Legislativa, 1958).

La oferta técnica abarca tres modalidades i) comercial y servicios, ii) agropecuaria e iii) industrial. Para el caso de la oferta agropecuaria incluye las especialidades de agroindustria, agrojardinería, agroecología, agroindustria alimentaria con tecnología agrícola, agroindustria alimentaria con tecnología pecuaria, agropecuario en producción agrícola, agropecuaria en producción pecuaria, riego y drenaje (MEP, 2017).

El objetivo de la educación técnica agropecuaria corresponde en desarrollar en los y las estudiantes los conocimientos, ha-

bilidades y destrezas que les permitan brindar espacio para la construcción de conocimientos, favorecer el desarrollo de la capacidad empresarial y gerencial, preparar técnicos que incorporen conceptos de salud ocupacional en la producción y desarrollar valores en los jóvenes respecto a la calidad de vida (Álvarez-Garay & Rodríguez-Gómez, 2015).

Para el caso de la Región Huetar Norte, se encuentran seis colegios técnicos y profesionales (CTP) y una finca universitaria (perteneciente al Instituto Tecnológico de Costa Rica). Estos ofrecen una oferta técnica agropecuaria vinculada a la realidad de la región, la cual se centra en actividades agrarias (piña, yuca, caña de azúcar, arroz, frijoles y cítricos) y pecuarias (ganado de leche y de engorde) (CSRA, 2011).

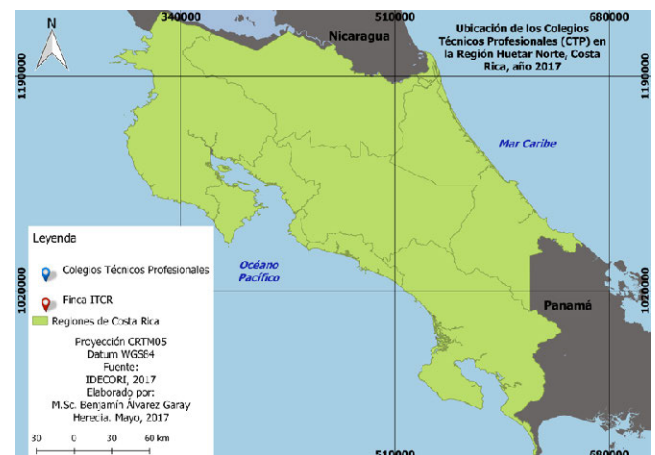


Figura 5: Ubicación CTP, Región Huetar Norte, 2017.

Fuente: Benjamín Álvarez Garay, 2016.

Uno de los principales CTP en la región corresponde al Nataniel Arias Murillo de Aguas Zarcas. Este centro de estudio posee las especialidades de agropecuaria en producción pecuaria y agroecología las cuales se desarrolla en la finca La Loma (73 hectáreas) y agroindustria que se presenta en el colegio.



Figura 6: Hato de ovejas en la finca La Loma, 2015.

Fuente: José Ignacio Álvarez Garay, 2015.

En esta finca el registro de las actividades pecuarias es una tarea constante; para cada curso el profesor a cargo lleva un registro histórico detallado de las tareas que se realizan, además del registro de cada animal (oveja, vaca, gallinas, caballos, cerdos) que ingresa a la finca y que se comercializa.

INVENTARIO ACTUAL PROYECTO OVEJAS FINCA LA LOMA CTP AGUAS ZARCAS SAN CARLOS.  
Sábado 11 Marzo 2017  
RAZA DORPER

# de Animal	Sexo M/H	Nacimiento	Raza	Madre	Padre	Observaciones
P2	M	NR, Aprox. Ene. 2011	DORPER	NR	NR	Padrote
36	H	28/09/2013	DORPER	NR	NR	
44	H	31/10/2013	DORPER	NR	NR	
51	H	11/4/2014	DORPER	NR	NR	
57	H	NR	DORPER	NR	NR	
58	H	Aprox. 2013	DORPER	NR	NR	
30	H	NR	DORPER	36	NR	
39	H	5/7/2015	DORPER	44	P2Santa Rosa	
65	H	27/8/2016	DORPER	44	P2Santa Rosa	
66	H	6/6/2016	DORPER	30	P2Santa Rosa	15-2-17 26 kg
70	H	9/12/2016	DORPER	36	P2Santa Rosa	15-2-17 20 kg
75	H	30/01/2017	DORPER	38	P2Santa Rosa	
76	M	6/02/2017	DORPER	36	P2Santa Rosa	
78	M	7/03/2017	DORPER	30	P2Santa Rosa	
79	M	10/03/2017	DORPER	44	P2Santa Rosa	Expo Venezuela

Figura 7: Registro de finca La Loma, proyecto ovejas.  
Fuente: CTP Aguas Zarcas, San Carlos 2017.

Sin duda, el registro de la finca La Loma CTP Nataniel Arias Murillo, Aguas Zarcas, es un claro ejemplo de un buen registro de una finca agropecuaria, ya que se anota en detalle cada actividad desarrollada y cada tarea ejecutada, desde la preparación, cosecha y comercialización de los productos.

Cabe mencionar que cada CTP existente en la región desarrolla su propio registro, en gran medida, son registros detallados, ya que cada colegio debe inventariar los recursos públicos con que cuenta en cada especialidad, lo que permite que las trazabilidades de sus productos estén registradas.

## 5. ORGANIZACIONES

La Región Huetar Norte es una zona productiva importante para Costa Rica, productos como raíces, tubérculos, granos básicos, frutas y leche, son sus principales aportes a la economía nacional, por tanto, se pueden ubicar diversos establecimientos que acopian, procesan y comercializan estos productos (Barrientos & Chaves, 2008).

En el sector de raíces y tubérculos la región se centra en productos como yuca, tiquizque, ñampi, ñame, yampi, jengibre, malanga coco y camote, distribuidos en 14000 hectáreas sembradas, para granos básicos los productos son arroz, maíz, frijol y piña con un área de 11000 hectáreas y para el caso de otros productos y frutales la región siembra ayote, plátano, papaya, palmito, pimienta naranja, chile picante, caña de azúcar, café, cacao y ornamentales, los cuales se distribuyen en 22 hectáreas (Barrientos & Chaves, 2008).

De estos productos la yuca, piña, caña de azúcar y arroz son los principales productos, por tanto, se analizarán estos productos y el registro generado.

La yuca y piña, son productos que pequeños y medianos productores siembran, cuando se cosechan, estos productos se acopian, procesan y comercializan en empacadoras o plantas productoras (en su gran mayoría). Estas empacadoras compran el producto, los cuales en un gran porcentaje no tienen un registro, es decir, todo el proceso de preparación, siembra y cosecha de la fruta no está registrado en un cuaderno o libro, simplemente los productores llevan el cultivo de acuerdo a lo que conocen y por recomendaciones de otros productores.

Cuando la empacadora compra el producto, estos se enfocan en la fruta como tal y no en todo el proceso productivo, como siembra y tipo de productos químicos que contiene la fruta. Al comprar el producto final, las empacadoras pagan por kilos o

toneladas y el precio se realiza de acuerdo a la demanda del mercado, ya sea nacional o extranjero.

La yuca es un producto importante para la zona, pues es el tubérculo más cosechado en la región y de seguido aparece la piña que por sus condiciones se aclimata de mejor forma a la región (SEPSA, 2013).



Figura 8: Plantación de piña, 2017  
Fuente: Empacadora piña albo, 2015

De acuerdo a la Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar (LAICA), creada mediante la ley 7818 del año 1998, menciona que en el registro de la caña de azúcar en Costa Rica, participan 13 ingenios azucareros, lo cual permite que los productores cuenten con facilidades industriales y condiciones reguladas por ley, para el acopio y procesamiento de su producción (LAICA, 2012).

Para la zafra 2014-2015, se cosecharon 3903985 toneladas métricas de caña de azúcar, en 53642 hectáreas cultivadas. Por tanto, el registro de este producto se realiza de forma adecuada y gradual, pues los productores de caña de azúcar en la Región Huetar Norte, disponen de 2 ingenios (Cutris y Quebrada Azul) para su procesamiento (LAICA, 2015).



Figura 9: Vista de una plantación de caña azúcar, 2015.  
Fuente: Ingenio Cutris S.A., 2015.

Por su parte la Corporación Arrocerera Nacional (CONARROZ), creado en 2002 por la ley 8285, tiene como objetivo establecer un régimen de relaciones entre productores y agroindustriales de arroz, que garantice la participación racional y equi-

tativa en esta actividad económica y fomenta los niveles de competitividad y el desarrollo de la actividad arrocera (CONARROZ, 2016).

Al igual que LAICA, CONARROZ lleva registro de los productores de arroz, ya sean estos pequeños (menos de 50 ha) o grandes productores (más de 200 ha). El registro principalmente consiste en datos del productor, datos de la finca, variedad de arroz, productos utilizados y periodo de siembra. Además CONARROZ provee apoyo técnico, proceso del producto final, estimado de la producción nacional y ciclos de producción, entre otras (CONARROZ, 2015).



Figura 10: Cosecha del cultivo de arroz, 2017  
Fuente: CONARROZ, 2017

De acuerdo al último informe estadístico de CONARROZ, se cosechó para la temporada 2015-2016 un total de 187577 toneladas de arroz, producidas por 811 productores y procesadas en 11 arroceras (CONARROZ, 2015).

La siembra, cosecha y producción de arroz, se realiza de acuerdo al registro de los productores ante el CONARROZ, por su parte esta instancia le da el seguimiento adecuado al cultivo, además que disponen de espacios para colocar el producto y pueden optar por el sistema de financiamiento para la producción.

#### IV. CONCLUSIONES

Los registros de información son instrumentos importantes para la toma de decisiones en diversos sectores, su utilidad se ve reflejada en datos que se emplean para conformar política local, regional y nacional.

De las cinco instancias analizadas, todas concuerdan en que los registros de información deben tener información base para que sea funcional. Esta información base se centra en datos de la persona productora, datos del producto o cultivo, datos de la cosecha y datos ambientales con que cuenta la finca.

El censo agropecuario es el instrumento por ley para la recolección de información agropecuaria, este se compone de diversas variables y metodologías que conforman la base de datos nacional del agro costarricense. Este se realiza a nivel nacional y define de buena forma lo que se siembra y cosecha en el territorio nacional, sin embargo, ocupa que la información obtenida sea socializada a todos los sectores y personas vinculadas al agro costarricense, para que así sea aplicado de forma eficaz los datos que se muestran.

El sector agropecuario costarricense lo componen una serie de instituciones públicas, las cuales llevan el registro de cada sector. Lo importante es que la información se maneja a escala regional y nacional, y son datos que sirven para aplicar cambios y metodologías en las regiones que se requiere.

Los centros agrícolas cantonales son las organizaciones cantonales que ayudan a registrar a los pequeños y medianos productores que aún no están incorporados en el sector agro costarricense. Estos promueven espacios para desarrollar muestras de cultivos, financiamiento de productos y espacios para la comercialización.

Los colegios técnicos profesionales son los formadores de los futuros productores, ya que impulsan en los jóvenes las bases y la cultura de la producción agraria costarricense. Estos CTP tratan de enseñar al adolescente que la producción de la tierra no debe ser un tema al azar, sino que una buena administración del suelo, buenos controles en el cultivo y un registro adecuado, lo puede convertir en un buen administrador de su espacio.

Las organizaciones no gubernamentales, son fundamentales en este proceso, pues además de ser creados por ley, brindan un espacio para que los productores de diversos cultivos, puedan asociarse y tener acceso a créditos, venta de productos, intercambio de conocimientos y apoyo técnico en diversos campos.

Es deber de cada productor estar registrado en su respectiva organización (como LAICA y CONARROZ), ya que de eso depende el apoyo técnico que se le pueda generar y con ello maximizar la calidad del producto final.

A nivel general se puede concluir que no existe un registro ideal para tener un óptimo cultivo, pues depende de variables propias de finca, variables climáticas, de mercado y de conocimientos técnicos, para comprender qué tipo de información es la necesaria y así ofrecer un producto de calidad y acorde a los estándares nacionales e internacionales.

## AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en primera instancia a Dios y mi familia por darme las fuerzas, motivación y energía para que este trabajo se pudiera desarrollar.

Un gran agradecimiento a la directora del CITTED, señora María Elena Murillo Araya, por el espacio y el aporte de recursos para que este proyecto esté vigente. También gracias al señor Luis Eduardo Montero Castro, Director de la Escuela de Ciencias Exactas y Naturales, por su apoyo, confianza y el espacio dado para trabajar y desarrollar este proyecto.

Muchas gracias al señor Héctor Brenes Soto, Encargado del Programa de Manejo de Recursos Naturales, ya que apoyó esta iniciativa y acá se puede ver el primer resultado. También gracias al compañero Luis Daniel Vega Herrera, co-investigador de este proyecto, ya vemos los frutos que se pueden obtener de una labor docente e investigativa.

Agradecido con las instituciones que participaron en las entrevistas (INEC, SEPSA, CAC, CTP Aguas Zarcas, LAICA y CONARROZ), ya que su aporte fue sumamente valioso para generar información del agro costarricense.

Muchas gracias a los compañeros y compañeras de trabajo, que de alguna y otra forma me han apoyado grandemente en el desarrollo de este proyecto y finalmente, agradecer a cada una de esas personas que estuvieron apoyando de alguna u otra forma... GRACIAS.

## REFERENCIAS

- Alvarado Salas, R. (2003). Regiones y cantones de Costa Rica. Costa Rica: San José. Recuperado de <http://www.ifam.go.cr/docs/regiones-cantones.pdf>
- Álvarez-Garay, J. I., & Rodríguez-Gómez, K. (2015). Acciones brindadas desde el área administrativa del CTP Nataniel Arias Murillo de Aguas Zarcas de San Carlos, en la decisión que toman los estudiantes que han finalizado el tercer ciclo para incorporarse a la especialidad de agropecuaria en producción pec. Universidad de San José.
- Asamblea Legislativa. Ley fundamental de educación, Pub. L. No. 2160 (1958). Costa Rica: La Gaceta.
- Barrientos, O., & Chaves, G. (2008). Región Huetar Norte: oferta exportadora actual y oferta potencial de productos agropecuarios alternativos. Costa Rica: San José.
- CONARROZ. (2015). Informe estadístico periodo 2015-2016. San José, Costa Rica. Recuperado de [http://www.conarroz.com/UserFiles/File/INFORME\\_ANUAL\\_ESTADISTICO\\_2015\\_2016.pdf](http://www.conarroz.com/UserFiles/File/INFORME_ANUAL_ESTADISTICO_2015_2016.pdf)
- CONARROZ. (2016). Conarroz. Recuperado de <http://www.conarroz.com/index.php/en/>
- CORFOGA. (2017). ¿Quiénes somos? - CORFOGA - Corporación Ganadera. Recuperado de <http://www.corfoga.org/quienes-somos/>
- CSRA. (2011). Plan Regional de Desarrollo Región Huetar Norte Sector Productivo. Costa Rica: Ciudad Quesada.
- FAO. (2007). Un sistema integrado de censos y encuestas agropecuarios (FAO). Roma, Italia: FAO.
- INEC. (2014a). Boleta censal del censo nacional agropecuario. San José, Costa Rica.
- INEC. (2014b). VI Censo Nacional Agropecuario. In Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (Ed.), (p. 24). San José, Costa Rica.
- INEC. (2015a). VI Censo Nacional Agropecuario: resultados generales. Costa Rica: San José.
- INEC. (2015b). VI Censo Nacional Agropecuario 2014: importancia y usos. Costa Rica: San José.
- LAICA. (2012). LAICA. Recuperado de <https://www.laica.co.cr/index.php>
- LAICA. (2015). Resultados de la zafra 2014-2015. San José, Costa Rica.
- MEP. (2017). Educación Técnica. Recuperado de <http://www.mep.go.cr/educacion-tecnica>
- MIDEPLAN. (2014). Región Huetar Norte: plan de desarrollo 2030. Costa Rica: San José.
- Poder Ejecutivo. Ley de fomento a la producción agropecuaria FODEA y orgánica del MAG (1992). Costa Rica: Poder Ejecutivo.
- República de Costa Rica. Creación de los Centros Agrícolas Cantonales (1999). Costa Rica: Poder Ejecutivo.
- República de Costa Rica. Reglamento de la Ley de Centros Agrícolas Cantonales (1999). Costa Rica: Poder Ejecutivo.
- Saborío, M., Carvajal, L., & Sánchez, A. (2014). Políticas para el sector agropecuario y el desarrollo de los territorios rurales 2015-2018. San José: Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial Agropecuaria y Área de Política Agropecuaria Rural.
- SEPSA. (2013). Boletín estadístico agropecuario n°23: serie cronológica 2009-2012. Costa Rica: San José.
- SEPSA. (2015). Secretaría Ejecutiva de Planificación Sectorial. Recuperado de <http://www.sepsa.go.cr/index.html>

# Planificación territorial: uso y ocupación del suelo rural. Caso cantón Pucará, provincia del Azuay

Delgado Omar<sup>1</sup>, Toledo Edgar<sup>1</sup>, Vélez Boris<sup>1</sup>, Quinde Tania<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador - IERSE/  
Vicerrectorado de Investigaciones/  
Universidad del Azuay  
Avenida 24 de mayo 7-77 y Hernán Malo/Azuay/Ecuador  
odelgado@uazuay.edu.ec,  
toledoedgar62@yahoo.es,  
boris.velez.t@gmail.com,  
aticoarqui@yahoo.es

## RESUMEN

La planificación territorial generalmente se aborda como urbana y rural, siendo ésta última la que ocupa mayor parte de un territorio, donde se desarrollan actividades de conservación, protección, agrícolas, ganaderas, entre otras; que proveen de recursos a centros urbanos. Sin embargo, la planificación de los espacios rurales se limita a información existente, muchas veces desactualizada y con cartografía poco detallada. El estado ecuatoriano a través del proyecto SIGTierras del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) ha producido a nivel de país, ortofotografía y modelos digitales de terreno al 2010 y escala 1:5.000; y por intermedio de la Secretaria Nacional de Planificación (SENPLADES), pone a disposición de las administraciones provinciales, cantonales y parroquiales denominados gobiernos autónomos descentralizados (GAD). Si bien la información se entrega a los GADs el uso es limitado. El presente estudio se realizó en el cantón Pucará que adicionalmente dispone del deslinde predial rural y en su afán de fortalecer la planificación cantonal busca la colaboración de instituciones de educación superior para determinar categorías de ordenación de uso y ocupación del suelo. El espacio físico rural del cantón Pucará fue estudiado mediante unidades ambientales producto de tres capas de información: cobertura vegetal y uso de suelo; pendientes en porcentaje y zonas altitudinales dando como resultado 40 unidades homogéneas sobre las que se determinaron 9 categorías y 19 subcategorías de uso y ocupación con tamaños mínimos de parcela, características de ocupación en concordancia con la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, uso y gestión del suelo.

Palabras clave: **Suelo rural, uso y ocupación del suelo, categorías de ordenación.**

## ABSTRACT

*Territorial planning is generally addressed in urban and rural areas, this last one being the one occupying most of a territory, where activities of conservation, protection, agricultural, livestock, among others are developed; which provide resources to urban centers. However, the planning of rural areas is limited to existing information, often outdated and with poorly detailed cartography. The Ecuadorian state through the SIGTierras project of the Ministry of Agriculture, Livestock, Aquaculture and Fisheries (MAGAP in Spanish) has produced at the country level, orthophotography and digital terrain models at 2010 and a scale 1:5.000; And through the National Secretariat of Planning (SENPLADES in Span-*

ish), makes available to the provincial, cantonal and parochial administrations known as decentralized autonomous governments (GAD in Spanish). Although the information is delivered to the GADs but the use is limited. The study was carried out in the canton of Pucará that additionally has the rural property demarcation and in its effort to strengthen cantonal planning seeks the collaboration of institutions of higher education to determine categories of land use and occupation. The rural physical space of the canton Pucará was studied through environmental units, produced by three layers of information: vegetation cover and land use, slopes in percentage and altitudinal zones, resulting in 40 homogeneous units, over which 9 categories and 19 subcategories of use and occupation were determined with minimum lot sizes, occupation characteristics in accordance with the Organic Law of Territorial Ordering, land use and management.

**Keywords:** Rural soil, land use and occupation, management categories.

## I. INTRODUCCIÓN

El estado actual de un territorio, en el contexto geográfico, es el resultado de las acciones naturales y antrópicas efectuadas sobre el espacio físico, como consecuencia de acciones humanas y decisiones políticas, lo que conlleva a pensar y proyectar acciones planificadas sobre un espacio geográfico (Gómez Orea 2013). El Ordenamiento Territorial, tiene como objetivo zonificar y sectorizar el territorio en función de sus potencialidades y de las necesidades de la población para mejorar la calidad de vida de sus habitantes aprovechando los recursos disponibles en armonía con el ambiente, promoviendo un desarrollo económico sostenible en el tiempo en correspondencia con un marco legal.

En la Constitución del 2008 de la República del Ecuador se fortalece la planificación territorial que parte con la Organización del Territorio - Título V, donde los gobiernos autónomos descentralizados tienen el deber y la obligación de trabajar en planificación para garantizar el ordenamiento territorial (Art.241 Constitución, 2008). En el capítulo VI, Régimen de Desarrollo se indica la obligatoriedad para con el Plan Nacional de Desarrollo, como “instrumento al que se sujetarán las políticas, programas y proyectos públicos; la programación y ejecución del presupuesto del Estado; y la inversión y la asignación de los recursos públicos; y coordinar las competencias exclusivas entre el Estado central y los gobiernos autónomos descentralizados” (GADs) (Art. 280, Constitución, 2008).

Con la vigencia desde el 2010 del Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomías y Descentralización COOTAD y del Código Orgánico de Planificación y Finanzas Públicas se establece las competencias específicas y concurrentes para los diferentes niveles de GADs que asumen el compromiso de orientar el proceso de planeación y ordenamiento de su desarrollo territorial; siendo los GADs cantonales quienes deben ejercer el control sobre el uso y ocupación del suelo.

La Asamblea Nacional en junio de 2016 aprobó la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo (LOOTUGS) en la que se establecen los alcances e instrumentos de ordenamiento territorial así como el planeamiento del uso y gestión del suelo.

La determinación del uso y ocupación del suelo, por parte de los GADs tiene dificultades por no contar con personal técnico especializado, limitaciones técnicas y financieras, información desactualizada, entre otras, por lo que deben recurrir a entidades de gobierno por asistencia técnica, contratar consultorías o pedir colaboración a instituciones de educación superior con experiencia en el tema. En este contexto la Universidad del Azuay a través del Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador IERSE, adscrito al Vicerrectorado de Investigaciones, suscribió un convenio con el Gobierno

Autónomo Descentralizado Municipal del cantón Pucará para “Determinar las categorías de ordenación del cantón Pucará”.

### I.1. ÁREA DE ESTUDIO

El cantón Pucará de la provincia del Azuay se localiza al suroeste del Ecuador, tiene una superficie de 585,09 km<sup>2</sup> con una población de 10 052 habitantes (INEC, 2010) de los cuales el 75.2% se dedican a las actividades de agricultura, ganadería, silvicultura y pesca; el 4.5% a comercio al por mayor y menor; 3.8 % a la construcción y 3.6% a la administración pública y defensa; y 12.9% a otras actividades entre enseñanza, explotación de minas y canteras; transporte y almacenamiento; industrias manufactureras; alojamiento y servicio de comidas. (INEC, 2010), (SENPLADES, 2012).

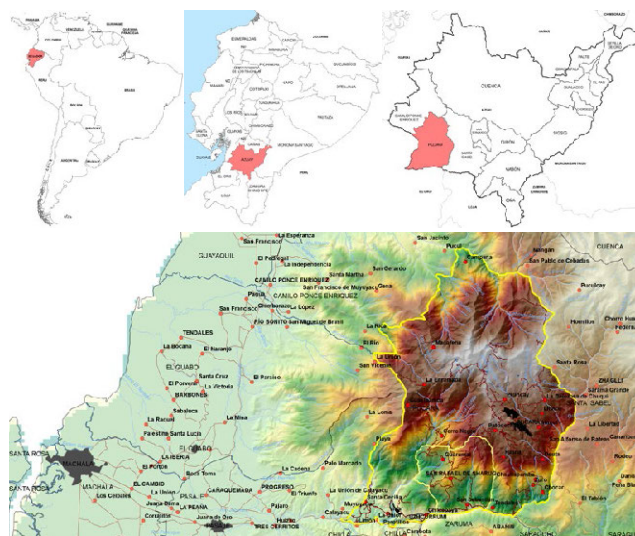


Figura 1. Localización del cantón Pucará.

## II. MÉTODO

La planificación territorial se desarrolla en tres etapas: diagnóstico, planificación territorial y gestión del plan (Gómez Orea, 2013) (Paruelo et al 2014,). Los espacios geográficos deben ser estudiados en su conjunto con la finalidad de entender el funcionamiento del sistema territorial para diseñar planes adecuados a las condiciones particulares de cada región. Este trabajo señala los procedimientos empleados para determinar las categorías de ordenación en el suelo rural como mecanismo de planificación territorial.

### II.1. DIAGNÓSTICO TERRITORIAL

El objetivo del diagnóstico es conocer, comprender y entender cómo funciona y cómo evolucionará el sistema territorial, a



través de los componentes: físico, biótico, socio-cultural, de población, asentamientos humanos, actividades económicas y canales de relación; para lo cual se requiere información científico-técnico que se complementa con el conocimiento local y una percepción de la ciudadanía y actores sociales.

De los componentes indicados, nos concentramos en el análisis del medio físico sobre el que se determinará la capacidad de acogida. El medio físico o natural se estudia por medio de unidades territoriales y de las alternativas evaluadas, se ha identificado que las unidades ambientales u homogéneas son las que mejor describen el territorio cantonal de Pucará. Las unidades ambientales son el resultado de la sobreposición de tres factores; cobertura vegetal y uso de suelo, pendientes en porcentaje y zonas altitudinales, dando como resultado 40 unidades ambientales: 22 productivas, 9 ecológicas, 2 científico culturales, 6 funcionales, y 1 de amenazas.

**TABLA I**  
COBERTURA VEGETAL Y USO DE SUELO, CANTÓN PUCARÁ, ESCALA 5K

COBERTURA VEGETAL Y USO DEL SUELO	SUPERFICIE (HA)	SUPERFICIE (%)
Área poblada	63,69	0,11
Bosque nativo	7943,06	13,53
Cubierta humo	163,20	0,28
Cuerpos de agua	13,59	0,02
Cultivos suelo arado	751,88	1,28
Formaciones rocosas	194,78	0,33
Páramo	4741,10	8,08
Pastizal	10578,89	18,02
Plantación forestal	359,22	0,61
Quemas	108,83	0,19
Río doble	126,32	0,22
Sin información	196,32	0,33
Sombras	177,69	0,30
Suelo descubierto	222,82	0,38
Vegetación arbustiva	26783,38	45,63
Vegetación herbácea	5990,97	10,21
Vías	274,82	0,47
	58690,56	100,0

Sobre las unidades ambientales se realiza una valoración cualitativa de los méritos para conservación o protección de la unidad ambiental atendiendo criterios ecológicos, científico/cultural, paisajísticos, funcionales y productivos; obteniendo una valoración total expresada como el promedio de los criterios parciales.

**TABLA II**  
RANGO PENDIENTES EN PORCENTAJE, CANTÓN PUCARÁ

PENDIENTE EN PORCENTAJE	SUPERFICIE (HA)	SUPERFICIE (%)
0-12 Pendientes débiles, suaves y regulares	1109,26	1,90
12-25 Pendientes regulares e irregulares	5712,26	9,77
25-50 Pendientes fuertes	21098,97	36,07
> 50 Pendientes muy fuertes y abruptas	30572,87	52,27

**TABLA III**  
ZONAS ALTITUDINALES

PISO BIOCLIMÁTICO	ZONA ALTI-TUDINAL	SUPERFICIE (HA)	SUPERFICIE (%)
Tierras bajas	Zona baja	11151,0	19,1
Piemontano			
Montano bajo	Zona media	33900,1	57,9
Montano			
Montano alto	Zona alta	13457,6	23,0
Montano alto superior			

El aporte del análisis del medio físico al diagnóstico territorial consiste en la determinación de la capacidad de acogida del territorio de las diferentes actividades que realiza la población sobre cada unidad ambiental; siendo necesario estimar las tasas de renovación anual e interanual de los recursos naturales renovables y de la capacidad de asimilación de los vectores ambientales: aire, agua y suelo.

Por capacidad de acogida se entiende el "grado de idoneidad" para determinadas actividades que expresa la relación actividad-territorio y proporciona un método para la integración de ambos aspectos. (Gómez Orea, 2013).

Identificar las actividades cotidianas que desarrolla una población sobre un territorio es de suma importancia en la planificación rural ya que se constituirán en las actividades a ordenar que junto con las acciones humanas son el aspecto central en la determinación de la capacidad de acogida.

Las principales actividades identificadas en el cantón son: producción artesanal y manufacturera, equipamiento comunal, protección de la naturaleza, restauración y regeneración ambiental, patrimonio cultural, científico cultural, recreación al aire libre, producción: agrícola, pecuaria, piscícola y forestal, extracción de recursos naturales, construcciones para actividades productivas, servicios generales, servicios profesionales, entre otros.

La capacidad de acogida se obtiene construyendo una matriz, colocando en las filas las unidades ambientales y en las columnas las actividades que desarrolla la población; y, para cada fila se evalúan las actividades: vocacionales, compatibles, compatibles con limitaciones, compatibles con restricciones e incompatibles. Cartográficamente, se representan las actividades vocacionales por unidad ambiental.

## II.2. PLANIFICACIÓN TERRITORIAL

Con la capacidad de acogida establecida a partir de las actividades que la población puede desarrollar sobre las unidades ambientales, se construyen las categorías de ordenación como elementos de planificación territorial; que son el resultado de analizar los usos y ocupación del suelo que se asigna a una o varias unidades ambientales. A su vez las categorías de ordenación deben guardar concordancia con la clasificación del suelo en urbano y rural según lo dispuesto en la Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo (LOOTUGS, 2016).

El suelo rural según la LOOTUGS se subclasifica en:

- 1) *Suelo rural de producción: Es el suelo destinado a actividades agroproductivas, acuícolas, ganaderas, forestales y de aprovechamiento turístico, respetuosas del ambiente.*
- 2) *Suelo rural para aprovechamiento extractivo: Es el suelo rural destinado por la autoridad competente, de conformidad con la legislación vigente, para actividades extractivas de recursos naturales no renovables, garantizando los derechos de la naturaleza.*
- 3) *Suelo rural de expansión urbana: Es el suelo rural que podrá ser habilitado para el uso urbano de conformidad con el plan de uso y gestión de suelo.*
- 4) *Suelo rural de protección: es el suelo rural que por sus especiales características biofísicas, ambientales, paisajísticas, socioculturales, o por presentar factores de riesgo, merecen medidas específicas de protección. No es un suelo apto para recibir actividades de ningún tipo, que modifiquen su condición, por lo que se encuentra restringida la construcción y el fraccionamiento".*

## CATEGORÍAS DE ORDENACIÓN

En el cantón Pucará, el suelo rural posee una cabida de 58.398,29 hectáreas lo que representa el 99,82% del territorio cantonal en la que se establecieron 9 categorías de ordenación y 19 subcategorías de ordenación que responden a las cuatro clases de suelo rural (Ver Anexo 1).

### Suelo rural de protección

Dentro de esta sub clasificación se encuentran todas las categorías encaminadas a la protección y conservación de los ecosistemas de importancia que se localizan dentro del territorio cantonal, así tenemos:

**Áreas naturales de protección:** Incluye las áreas de especial interés constituida por las unidades ambientales que se encuentran sobre la cota 3300 msnm, integrada por páramo, bosque nativo, vegetación arbustiva; así como las siguientes unidades ambientales que se encuentran por debajo de esta cota como: bosque nativo, vegetación nativa (vegetación arbustiva), cuerpos de agua, complejos fluviales.

**Áreas de conservación del patrimonio cultural:** Dentro de estas áreas se encuentran las zonas de interés cultural localizadas en el cantón, mismas que en su mayoría están inventariadas por el INPC (Instituto Nacional de Patrimonio Cultural).

**Áreas de recuperación:** Son zonas degradadas que se localizan en pendientes superiores al 50%, así como aquellas áreas con prevalencia de vegetación introducida no acordes al ecosistema en el que se encuentran y áreas que poseen vegetación herbácea. Comprende áreas que actualmente se encuentran ocupados por especies introducidas al ecosistema páramo como: pino, pasto, en las cuales se pretende sustituir estas por especies nativas.

### Suelo rural de producción

En esta sub clasificación de suelo se encuentran las categorías cuya asignación de uso está encaminada a la producción sea esta ganadera o agrícola, así tenemos:

**Áreas agropecuarias:** Dentro de esta se encuentran las siguientes subcategorías: Áreas agropecuarias sin restricción, que constituyen los terrenos con vocación agropecuaria ubicados en pendientes menores al 25%.

**Áreas agropecuarias con restricción:** constituidas por terrenos con pendientes comprendidas entre 25 y 50% lo que restringe ciertas actividades agropecuarias.

**Áreas agropecuarias de protección:** conformadas por terrenos que se encuentran con coberturas de bosque nativo y vegetación nativa (arbustiva) en pendientes superiores al 50%.

**Áreas agropecuarias de recuperación** que corresponde a terrenos que se encuentran con coberturas de vegetación herbácea, cultivos, pastos en pendientes superiores al 50%

**Áreas de agricultura y residencia:** Aquí se pretende lograr un balance entre los recursos naturales disponibles y la demanda de la población, en donde se puede obtener un aprovechamiento productivo de la parcela tecnificándolas a través del uso de invernaderos pequeños y huertos familiares. A estas áreas se las ha zonificado a través de tres sectores:

### Suelo rural de aprovechamiento extractivo

En esta sub clasificación del suelo se encuentran como categorías de ordenación los sectores estratégicos definidos por el Estado central. Para su emplazamiento y realización de actividades de explotación de recursos naturales, se requerirán de

estudios específicos de detalle y la obtención de los respectivos permisos ambientales otorgados por la autoridad competente, no obstante se considerarán obligatorias las siguientes determinantes adicionales para dichos estudios.

Al localizarse estos proyectos estratégicos en áreas de importancia ecológica del cantón considerados ecosistemas frágiles, afectan ecosistemas importantes tales como: páramo, relictos de bosques naturales, bosque nublado y varios cursos de agua que a su vez son afluentes en su mayoría de ríos de importancia del cantón; por tanto, se mantendrá el margen de protección que se propone dentro de la categoría de ordenación "Áreas de Protección de cauces de ríos, quebradas o cualquier curso de agua", no se permitirá el establecimiento de campamentos para los asentamientos pendulares de las personas que trabajaran en estos lugares, estas poblaciones se localizarán en lugares específicos que se establecerán en los estudios a detalle que aprobará el GAD Municipal del cantón Pucará, previo el inicio del proyecto estratégico.

Las categorías de ordenación de esta sub clasificación del suelo son: Concesiones mineras; y Proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco.

### Suelo rural de expansión urbana

Dentro de este nivel de uso se encuentran áreas sin vocación de uso definido, por tanto la conforman las zonas más aptas para soportar usos que consumen de forma irreversible el territorio; las categorías que pertenecen a este nivel de uso son:

**Área de expansión urbana:** Son terrenos que se encuentran colindantes con el área urbana de Sarayunga y se subdivide en dos sectores.

**Asentamientos humanos concentrados:** Localizados en Cerro Negro, Guarumal, Las Palmas y Pelincay.

**Asignación de usos de suelo.-** Para cada categoría de ordenación de suelo rural se determinó los usos principales, complementarios, restringidos y prohibidos.

## CARACTERÍSTICAS DE OCUPACIÓN

Con la finalidad de regular las actuaciones antrópicas en lo referente a la ocupación del suelo, y en función de las categorías asignadas a éste, se han determinado características referidas a tamaños de parcelas, tamaños de construcciones, tipos de implantación, alturas, retiros entre otros.

### Tamaño de parcela

La regulación del tamaño de parcela en las categorías de ordenación que lo permitan, evitará el excesivo fraccionamiento del suelo y en consecuencia su degradación y por otro lado normará los procesos de consolidación de asentamientos humanos. El 90,8% de la superficie del cantón Pucará cuenta con deslinde predial, donde el tamaño de lote que predomina tiene una superficie de parcela mayor o igual a una hectárea que representan el 96,5% de la superficie con deslinde predial, mientras que un 2,2% tiene tamaños entre 0,5 y una hectárea, y tan solo el 1,3% tiene tamaños inferiores a 0,5 de hectárea.

**TABLA IV**  
TAMAÑOS DE PARCELA

TAMAÑO LOTE (HA)	NÚMERO DE LOTES	SUPERFICIE (HA)	LOTES (%)	SUPERFICIE (%)
< 0,1	1729	74,66	15,6	0,14
0,10 - 0,25	1147	194,71	10,3	0,37
0,25 - 0,50	1231	449,53	11,1	0,85
0,50 - 1	1585	1156,08	14,3	2,18
1 - 5	3405	7940,44	30,7	14,94
5 - 10	898	6277,26	8,1	11,81
10 - 50	936	19738,05	8,4	37,14
> 50	162	17315,72	1,5	32,58
<b>Promedio: 4,791</b>	<b>11093</b>	<b>53146,45</b>	<b>100,0</b>	<b>100,0</b>

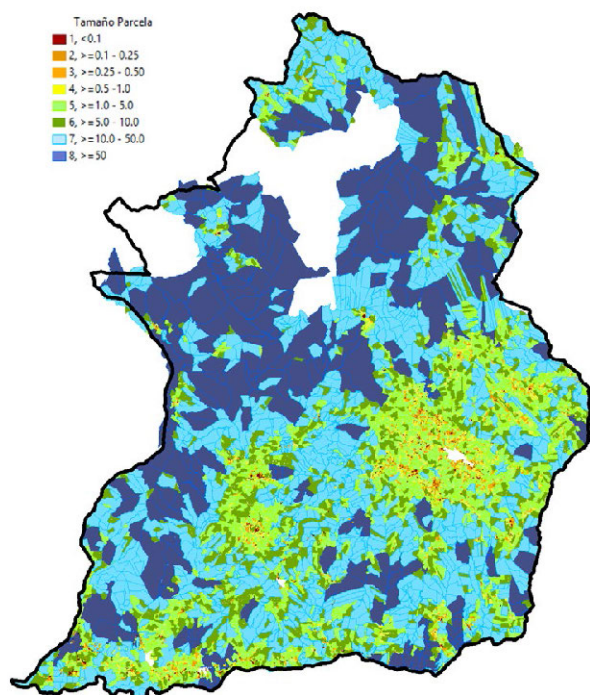


Figura. 2. Deslinde Predial

Para establecer el tamaño de parcela recomendado para las categorías de ordenación se realizó un análisis de los tamaños de lote existentes en cada categoría buscando la compatibilidad con las necesidades de la población para desarrollar actividades económicas productivas en correspondencia con la capacidad de acogida.

**TABLA V**  
TAMAÑOS DE PARCELA POR CATEGORÍA DE ORDENACIÓN

TAMAÑO	NP	PC	RA	AG	AR	EU	TOTAL
< 0,1	10,9	0,5	8,2	33,8	12,3	8,6	74,3
0,10-0,25	27,7	3,2	25,3	113,7	15,0	9,1	194,1
0,25-0,50	74,1	8,0	70,9	269,7	16,7	9,8	449,2
0,50 - 1	232,4	30,6	202,5	655,5	24,8	8,1	1153,9
1 - 5	2566,9	101,6	2079,0	3041,1	65,9	37,2	7891,7
5 - 10	2816,0	36,8	2122,3	1223,1	47,7	5,3	6251,3
10 - 50	11755,8	-	6163,2	1524,2	18,2	-	19461,3
> 50	13259,0	-	3121,0	196,3	-	66,2	16642,4
<b>Total</b>	<b>30742,7</b>	<b>180,8</b>	<b>13792,4</b>	<b>7057,3</b>	<b>200,6</b>	<b>144,3</b>	<b>52118,2</b>

NP: Natural de protección, PC: Protección de Patrimonio Cultural, RA: Recuperación Ambiental, AG: Agropecuaria, AR: Agricultura y residencia, EU: Expansión urbana

Los tamaños de parcela identificados para cada categoría de ordenación se indican a continuación:

Suelo rural de protección.- De conformidad con las disposiciones contenidas en el artículo 471 del Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización – COOTAD, queda prohibido el fraccionamiento del suelo en estas categorías de ordenación, ya que se trata de áreas ecológicamente sensibles como son bosques, humedales, páramo.

Suelo rural de producción / categoría de ordenación áreas agropecuarias.- Para esta categoría de ordenación se ha realizado un análisis de los lotes existentes dentro de estas áreas, así como del tamaño mínimo de parcela que ofrezca una rentabilidad a los propietarios; sobre esta base se ha establecido para estas zonas el tamaño mínimo de parcela en 1 ha.

Suelo rural de producción / categoría de ordenación áreas de agricultura y residencia: El área denominado como de Agricultura - residencial, se divide en tres sectores que contienen parcelas con superficies entre 1000, 1500 y 5000 m<sup>2</sup>, en el que se puede obtener un aprovechamiento productivo de la parcela tecnificándolas a través del uso de invernaderos pequeños y huertos familiares. Sector 1: 5000 m<sup>2</sup>; Sector 2: 1500 m<sup>2</sup>; Sector 3: 1000 m<sup>2</sup>

Suelo rural de expansión urbana: En estos territorios se ha establecido un tamaño mínimo de parcelas de 500 y 1000 m<sup>2</sup>. Sector 1: 1000 m<sup>2</sup>; Sector 2: 500 m<sup>2</sup>.

Suelo urbano / nuevos núcleos urbanos en suelo rural: Se encuentra dentro de esta categoría a los asentamientos de Cerro Negro, las Palmas, Guarumal, Pelincay, en los que se propone un tamaño mínimo de parcela de 300 m<sup>2</sup>.

#### CARACTERÍSTICAS DE LA EDIFICACIÓN

Permiten controlar los procesos de diseño y construcción de las futuras edificaciones, su regulación es importante en el contexto de este plan por el alto impacto producido debido al emplazamiento de edificaciones en el territorio principalmente en lo relacionado al paisaje, áreas de riesgo, etc. Las características de la edificación se regularán en términos de: Tipos de implantación, alturas de las edificaciones, retiros, materiales de construcción, áreas de construcción. En la tabla VI (Anexo 1) se detallan los tamaños de parcela y características de edificación por subcategoría de ordenación.

### III. RESULTADOS

Para el suelo rural del cantón Pucará se cuenta con información cartográfica a escala 1:5.000 de cobertura vegetal y uso de suelo; modelo digital de terreno, deslinde predial, unidades ambientales, valoración territorial, capacidad de acogida y categorías de ordenación. La representación cartográfica del cantón está contenida en 30 hojas por aspecto temático.

Se determinaron 9 categorías y 19 subcategorías de ordenación con identificación específica el uso y actividades principales, complementarias, restringidas y prohibidas, el tamaño mínimo de parcela recomendado, área de construcción en planta baja, número de pisos y características de construcciones complementarias para actividades agropecuarias.

En el cantón Pucará al 2011 se contabiliza 11093 lotes con registro predial, de los cuales 5692 lotes (51,3%) tienen un tamaño inferior o igual a 1 hectárea y se emplazan en el 3,5% de la superficie catastrada.

Para el suelo rural de protección conformado por las categorías: aérea natural de protección, de protección del patrimonio

nio cultural y de recuperación existen 5462 lotes que cubren una superficie de 44715,9 hectáreas, sin embargo no se establece ningún tamaño de parcela por cuanto el fraccionamiento está prohibido según Art. 471 COOTAD.

En el suelo rural de producción: categoría áreas agropecuarias el 84,8% de lotes tienen un tamaño superior a 1 hectárea que constituye el tamaño mínimo propuesto; mientras que en la categoría agricultura y residencia, en cuanto al sector 1 donde se establece como tamaño mínimo de parcela 5000 m<sup>2</sup>, el 88,5% tiene lotes con superficies superiores al establecido, de igual manera en el sector 2 el 80,6% tiene lotes superiores a 2500 m<sup>2</sup> y en el sector 3 el 92,1% tiene lotes superiores a 1000 m<sup>2</sup>.

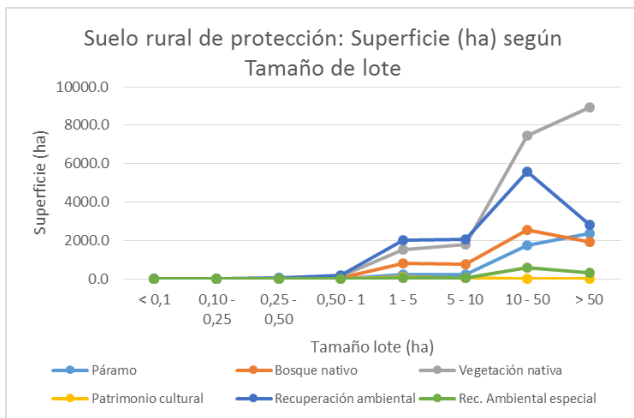


Figura. 3. Superficie cubierta según tamaños de lote en suelo rural de protección.

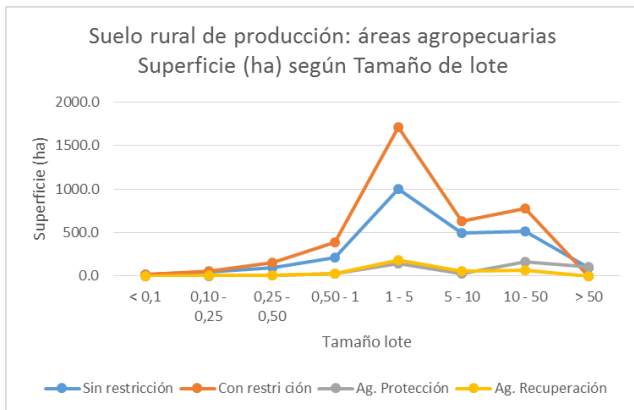


Figura. 4. Superficie cubierta según tamaños de lote en suelo rural de producción: categoría de áreas agropecuarias.

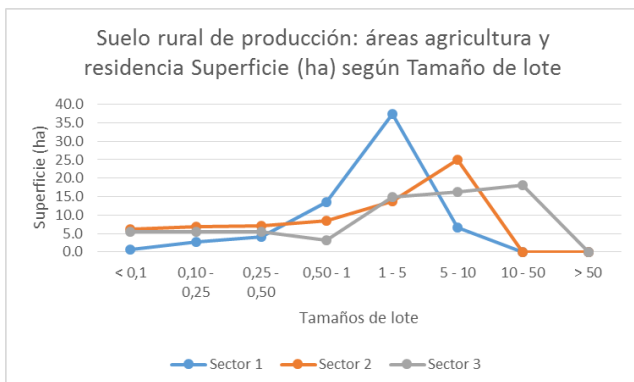


Figura. 5. Superficie cubierta según tamaños de lote en suelo rural de producción: categoría de agricultura y residencia.

#### IV. CONCLUSIONES

En el Ecuador en la última década la planificación y ordenamiento territorial han tomado gran importancia que parte desde la Constitución pasando por códigos orgánicos y leyes orgánicas que han llevado de un nivel de planificación mínima y desarticulada entre entidades del estado a contar con un plan nacional de desarrollo y una estrategia territorial que es de carácter obligatorio para las entidades públicas y orientativa para las privadas. La Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo LOOTUGS, establece los principios y reglas que rigen el ejercicio de las competencias de ordenamiento territorial, uso y gestión del suelo urbano y rural, y su regulación; incide significativamente sobre la planificación territorial a nivel de los Gobiernos Autónomos Descentralizados GAD siendo una competencia exclusiva de los GAD municipales planificar el desarrollo cantonal y formular los correspondientes planes de ordenamiento territorial, de manera articulada con la planificación nacional, regional, provincial y parroquial, con el fin de regular el uso y la ocupación del suelo urbano y rural. Entidades oficiales del Estado generan geoinformación como el proyecto SIGTierras del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca (MAGAP) que, a través de Secretaría Nacional de Planificación (SENPLADES), ha puesto a disposición de los GADs cantonales insumos para la planificación, como la ortofotografía y el modelo digital del terreno (MDT) correspondiente al año 2010; a su vez algunos GADs suscribieron convenios con SIGTierras para la elaboración del catastro rural a nivel cantonal, información que facilita de manera significativa la ejecución de este tipo de estudios. El GAD municipal de Pucará de la provincia del Azuay, dispone de ortofotografía, modelo digital de terreno y deslinde predial y en su afán de mejorar y fortalecer la planificación cantonal ha establecido formas de colaboración con entidades públicas y privadas; y de manera particular con instituciones de educación superior en la determinación de categorías de ordenación de uso y ocupación del suelo. De las diferentes metodologías existentes que permiten analizar el sistema territorial, se encuentran las unidades territoriales y de manera específica se establecieron unidades ambientales también conocidas como unidades homogéneas. En este estudio el diagnóstico territorial parte del análisis del medio físico, lo que determina las categorías de ordenación en las que se establece la capacidad de acogida del suelo rural y posterior clasificación y subclasificación del suelo ajustadas a la LOOTUGS, que permiten entender el funcionamiento del territorio y proyectar su planificación a corto mediano y largo plazo.

Para obtener un buen resultado en la planificación territorial, los GADs deben contar con un equipo técnico formado en ordenamiento territorial y manejo de sistemas de información geográfica y se requiere la intervención multisectorial y coordinación interinstitucional. Las tecnologías de la información geográfica TIG son herramientas necesarias para una efectiva, eficaz y eficiente ordenación territorial. Las Instituciones de Educación Superior a través de convenios con los GADs pueden fortalecer la planificación territorial mediante el asesoramiento, capacitación técnica y transferencia tecnológica.

### AGRADECIMIENTOS

Nuestro agradecimiento al señor Rogelio Reyes Delgado alcalde del GAD Municipal de Pucará, por la confianza depositada en el grupo de Geomática y Territorio de la Universidad del Azuay para la "Determinación de las categorías de ordenación del cantón Pucará" proyecto desarrollado a través de un convenio de cooperación interinstitucional y a los señores Carlos Tenesaca Pacheco, Pablo Parra Rubio, Daniel Zumba Arichávala y Vanessa Contreras Álvarez por el trabajo desarrollado en la generación del mapa de cobertura vegetal y uso del suelo del cantón Pucará a escala 1:5.000.

### REFERENCIAS

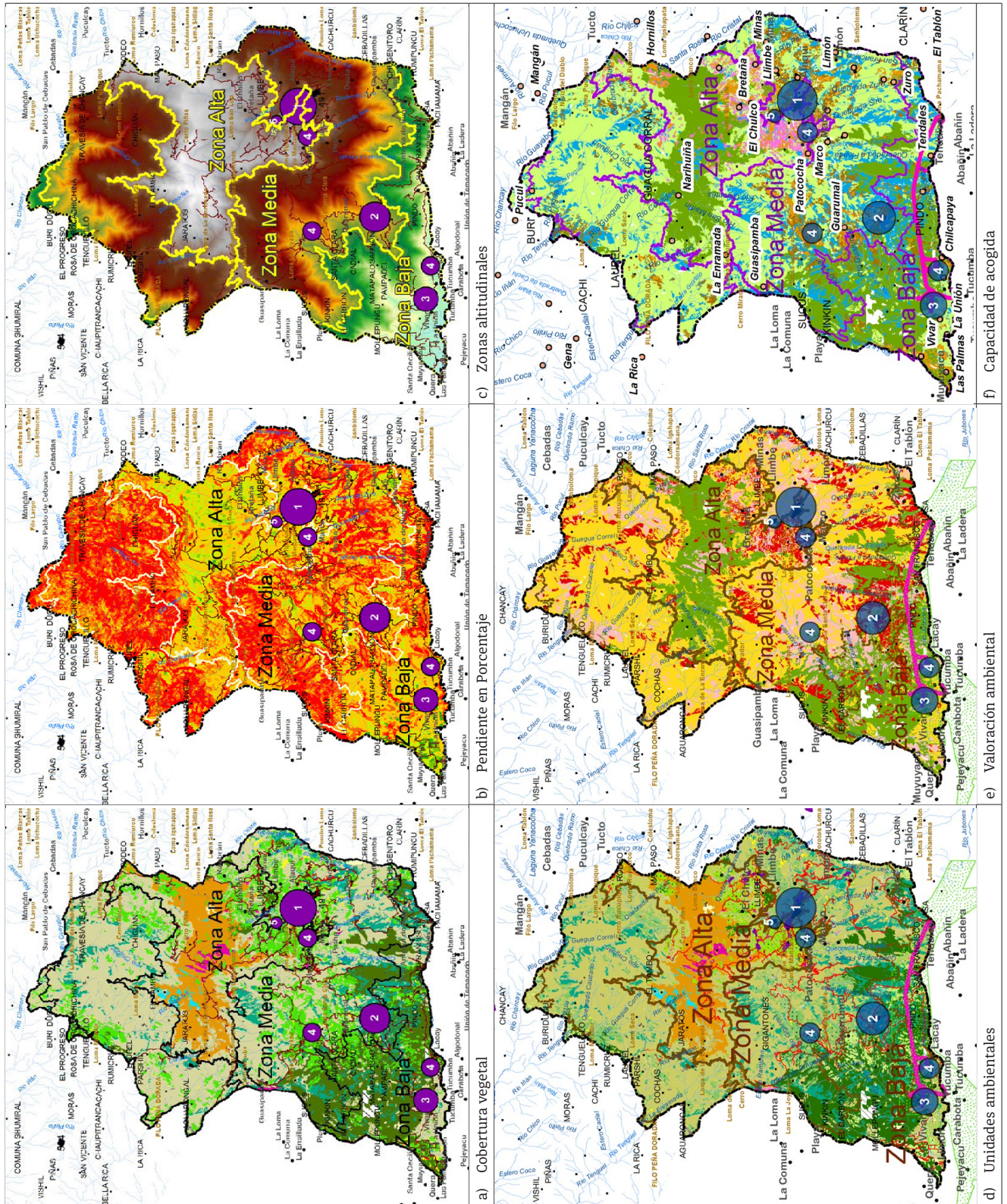
- Buzai, G., Baxendale, C., (2006). Análisis socioespacial con Sistemas de Información Geográfica. Lugar, Editorial. GE-PAMA Grupo de Ecología del Paisaje y Medio Ambiente Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. ISBN 978-950-892-264-8.
- Código Orgánico de Organización Territorial, Autonomía y Descentralización, Registro Oficial No. 303 - Suplemento, Quito, Ecuador, 19 de octubre de 2010.
- Código Orgánico de Planificación y Finanzas Públicas, Registro Oficial No. 306 - Segundo Suplemento, Quito, Ecuador, 22 de octubre de 2010.
- Chuvieco, E., (2010). Teledetección Ambiental. Editorial Ariel Ciencia, Barcelona, España. ISBN 978-84-344-3498-1.
- Delgado, O., Quinde T., Vélez, B., Toledo, E., Tenesaca C., (2016), Informe técnico. Convenio de Cooperación Interinstitucional con el GAD Municipal del cantón Pucará para la "Determinación de Categorías de Ordenación", Universidad del Azuay, Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador - IERSE. Cuenca - Ecuador.
- Gómez, D., (2013). Ordenación Territorial. Ediciones Mundi-Prensa. (3a.ed.). Madrid, España. ISBN 978-84-8476-660-5.
- Gómez, M., y Barredo, J., (2005). Sistemas de Información Geográfica y Evaluación Multicriterio en la Ordenación del Territorio, Editorial RaMa. (2a. ed.). Madrid, España.
- Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, Uso y Gestión del Suelo, Registro Oficial No. 790 - Suplemento, Quito, Ecuador, 5 de julio de 2016.
- Ley Orgánica de Tierras Rurales y Territorios Ancestrales, Registro Oficial No. 711 - Suplemento, Quito, Ecuador, 14 de marzo de 2016.
- MAE - MAGAP, (2015). Protocolo metodológico para la elaboración del mapa de cobertura y uso de la tierra del Ecuador continental 2013-2014, escala 1:100.000.
- Moreno, A., (2008). Sistemas y Análisis de la Información Geográfica. Editorial RaMa. (2a. ed.). Madrid, España.
- Moreno, A., (2012), Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones en Diagnósticos Territoriales y Decisiones Geoambientales. Editorial RaMa. (2a. ed.). Madrid, España.
- Pauta, F., (2013), Ordenación Territorial y Urbanística: Un camino para su aplicación en el Ecuador, Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador. ISBN 978-9978-14-244-8.
- Paruelo, J. M., Jobbágy E. G., Lateral P., Dieguez H., Gracia Collazo M.A., Panizza A. (2014). Ordenamiento Territorial Rural: conceptos, métodos y experiencias. Universidad de Buenos Aires, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Organización de Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. ISBN 978-95-5-308619-1
- Peña, J., (2009). Sistemas de Información Geográfica aplicados a la Gestión del Territorio Editorial Club Universitario. (4a. ed.). San Vicente - Alicante, España.
- Plan Nacional de Desarrollo / Plan Nacional del Buen Vivir 2013-2017, Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo - SENPLADES, 2013, Quito, Ecuador.
- Rubiano, N., González, A., Toledo, A., Zamudio, L., Cano, C., Córdoba C., Parra, E., (2003). Población y Ordenamiento Territorial, Universidad Externado de Colombia, Fondo de Población de las Naciones Unidas, Bogotá, Colombia. ISBN 958-616-750-X.
- Villacís B., Carrillo D. Estadística Demográfica en el Ecuador: Diagnóstico y Propuesta. Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC). Quito - Ecuador. 2011
- VII Censo de Población y VI de Vivienda (2010). Conjunto de datos de uso público, suministrado por el Instituto Nacional de Estadística y Censos del Ecuador.

**ANEXO 1.**

**TABLA VI**  
TAMAÑOS DE PARCELA, CARACTERÍSTICAS DE OCUPACIÓN Y EDIFICACIÓN POR SUBCATEGORÍA DE ORDENACIÓN

Subclasificación del suelo	Categorías de ordenación	Subcategorías de ordenación	Tamaño parcela	Construcción en planta baja	Número pisos	Vivienda	Construcciones complementarias para Act. agrop.	Galpones y/o invernaderos	
Suelo rural de protección	Área natural de protección	Páramo	Prohibido el fraccionamiento. Art. 471. COOTAD	Construcción restringida	-	-	-	-	
		Bosque nativo							
	Áreas de protección Cultural	Vegetación nativa (arbusativa)							
		Áreas de protección de causes de ríos, quebradas o cualquier curso de agua							
Suelo rural para aprovechamiento extractivo	Áreas de recuperación	Áreas de protección del patrimonio	-	-	-	-	-	-	
		Áreas de recuperación ambiental							
	Concesiones mineras	Proyecto hidroeléctrico Minas San Francisco	-	-	-	-	-	-	-
		Áreas agropecuarias sin restricción							
Suelo rural de producción	Áreas agropecuarias	Áreas agropecuarias con restricción	Mínimo 1 ha.	Máx. <sup>2</sup> 200 m <sup>2</sup>	2	Unifamiliar	Máx. <sup>2</sup> 100 m <sup>2</sup>	50% del área de parcela	
		Áreas de protección		Máx. <sup>2</sup> 200 m <sup>2</sup>	2	Unifamiliar*	No permitido	No permitido	
		Áreas de recuperación		-	-	-	-	-	-
		Sector 1 - 5000		-	-	-	-	-	-
	Áreas de agricultura y residencia	Sector 1 - 1500	5000 m <sup>2</sup>	Máx. <sup>2</sup> 200 m <sup>2</sup>	2	Unifamiliar	Máx. 100 m <sup>2</sup>	Máx. 100 m <sup>2</sup>	25% del área de parcela
		Sector 1 - 1000	1500 m <sup>2</sup>	Máx. <sup>2</sup> 150 m <sup>2</sup>	2	Unifamiliar	Máx. 100 m <sup>2</sup>	Máx. 100 m <sup>2</sup>	20% del área de parcela
		Sector 1 - 1000	1000 m <sup>2</sup>	Máx. <sup>2</sup> 150 m <sup>2</sup>	2	Unifamiliar	Máx. 100 m <sup>2</sup>	Máx. 100 m <sup>2</sup>	15% del área de parcela
	Suelo rural de expansión	Áreas expansión urbana	Sector 1 - 1000	1000 m <sup>2</sup>	Máx. <sup>2</sup> 150 m <sup>2</sup>	2	Unifamiliar	Máx. 100 m <sup>2</sup>	15% del área de parcela
			Sector 2 - 500	500 m <sup>2</sup>	Máx. <sup>2</sup> 150 m <sup>2</sup>	2	Unifamiliar	No permitido	-
		Asentamientos humanos concentrados	300 m <sup>2</sup>	45% COS	2	Unifamiliar	No permitido	No permitido	-

**ANEXO 2**  
**SECUENCIA PARA**  
**GENERACIÓN MAPA**  
**DE CAPACIDAD DE**  
**ACOGIDA**







# Desarrollo energético local en función de la mitigación al cambio climático

Vázquez Pérez Antonio, Rodríguez Gámez María, Washington Castillo Jurado

1 Carrera de Eléctrica/Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas/Universidad Técnica de Manabí  
Avenida Urbina y Che Guevara, Portoviejo/Manabí/Ecuador  
antoniov5506@gmail.com, talian-gel270557@gmail.com, wcastillo@utm.edu.ec

## RESUMEN

En un clima social donde apenas se conozca medianamente la evolución histórica de la situación ambiental del planeta, no se discute la necesidad de proteger la vida de las consecuencias derivadas del progreso social. Ahora el debate se centra en cómo se pudiera proteger la vida, en ese caso no es difícil advertir, que bajo los esquemas tradicionales no será posible alcanzar las metas del desarrollo sostenible. En el trabajo se muestra un análisis conceptual sobre los antecedentes históricos del desarrollo energético local, donde la influencia de las políticas económicas operadas durante las transiciones energéticas, fueron relegando cualquier vestigio de soluciones de tipo local, ignorando el papel del territorio y las localidades en el destino energético, imponiéndose un modelo de desarrollo centralizado que se sustentó cada vez más en el consumo de recursos naturales fósiles, con una industria ineficiente y contaminadora por excelencia. El objetivo del trabajo es mostrar un análisis de la contribución del desarrollo energético local a la mitigación de los efectos del cambio climático, tomando como paradigma el aprovechamiento de las fuentes renovables de energía bajos los criterios técnicos de la generación distribuida, dirigido al mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad. Se muestran los resultados preliminares obtenidos del proyecto SIGDES (Sistema de Información Geográfica para el Desarrollo Sostenible), relacionados con el estudio de los potenciales renovables en la provincia de Manabí, además de la necesidad de acoger un modelo de desarrollo energético que adopte como paradigma los conceptos asociados al desarrollo local y el aprovechamiento adecuado de los recursos endógenos.

Palabras clave: **Gestión energética sostenible, desarrollo local, generación distribuida, fuentes renovables de energía, energía solar.**

## ABSTRACT

*In a social climate where the historical evolution of the planet's environmental situation is scarcely known, the need to protect life from the consequences of social progress is not discussed. The debate now focuses on how life could be protected, in which case it is not difficult to warn, that under traditional schemes it will not be possible to achieve the goals of sustainable development. The paper shows a conceptual analysis of the historical background of local energy development, where the influence of the economic policies carried out during the energy transitions were relegated to any vestige of local solutions, ignoring*

*the role of the territory and the localities in the Energy destiny, imposing a model of centralized development that was based more and more on the consumption of fossil natural resources, with an inefficient and polluting industry par excellence. The objective of this work is to show an analysis of the contribution of local energy development to the mitigation of the effects of climate change, taking as a paradigm the use of renewable energy sources under the technical criteria of distributed generation, aimed at improving the Quality of life of society. The preliminary results obtained from the SIGDES (Geographic Information System for Sustainable Development) project, related to the study of the renewable potential in the province of Manabí, are shown, as well as the need to host a model of energy development that adopts as paradigm the Concepts associated with local development and the adequate use of endogenous resources.*

**Keywords:** *Sustainable energy management, local development, distributed generation, renewable energy sources, solar energy.*

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente se puede afirmar que resulta muy difícil lograr el desarrollo sostenible de la sociedad, anclado en los tradicionales conceptos de un sistema ineficiente de generación, distribución y suministro centralizado de la energía, dependiendo básicamente de robustas centrales generadoras, que distribuyen la energía a grandes distancias mediante un complejo y amplio sistema de distribución de electricidad, con extensas líneas de transportación y un amplio sistema de distribución que cada vez depende más de sofisticadas y costosas tecnologías (Montesino, 2010).

La actual situación mundial relacionada con el cambio climático aún no tiene las soluciones implementadas, a pesar de las estrategias trazadas por diferentes organizaciones internacionales donde se incluye la Agencia Internacional de Energía (AIE) y sus propuestas para mitigar los efectos negativos del clima, que en la mayoría de los casos afectan a los países pobres y en vías de desarrollo, donde aún no se trazan políticas adecuadas para darle solución a dichos problemas (Rodríguez, 2012).

La República del Ecuador es un país situado en la parte noroeste de América del Sur. Limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú y al oeste con el océano Pacífico. Posee una extensión territorial de 283.561 km<sup>2</sup>. Además del territorio continental, está formado por el archipiélago de Colón o Galápagos como también se le conoce, aparte de otras cercanas al continente, como Puná, Santay, y la Isla de la Plata (INOCAR, 2012).

Las principales unidades del relieve ecuatoriano son la llanura costera al norte del Golfo de Guayaquil, la sección de la Cordillera de los Andes en el centro del país y un extenso sector de la llanura amazónica ubicado al oriente del país. Hacia el suroeste se ubica el Golfo de Guayaquil, donde desemboca el río Guayas en el Océano Pacífico. Muy cerca de Quito, la capital, sobre la Cordillera de los Andes, se alza el Cotopaxi, el volcán activo más alto del mundo.

Ecuador se encuentra sobre la línea ecuatorial terrestre por lo cual su territorio se encuentra en ambos hemisferios. Comprende dos espacios distantes entre sí: el territorio continental al noroeste de América del Sur con algunas islas adyacentes a la costa y el archipiélago o provincia insular de Galápagos, que se encuentra a 1000 kilómetros de distancia del litoral ecuatoriano en el Océano Pacífico.

Manabí es una de las 24 provincias que conforman la República del Ecuador, situada al occidente del país, en la zona geográfica conocida como región litoral o costa. Su capital administrativa y ciudad más poblada es la ciudad de Porto-

viejo. Ocupa un territorio de unos 18.400 km<sup>2</sup>, siendo la quinta provincia del país por extensión, detrás de Pastaza, Morona Santiago, Orellana y Sucumbíos. Además del territorio continental, pertenecen a la jurisdicción de la provincia la Isla de la Plata y la Isla Salango. Limita al norte con Esmeraldas, por el este con Santo Domingo de los Tsáchilas y Los Ríos, al sur con Santa Elena, al este y al sur con Guayas y al oeste con el océano Pacífico a lo largo de una franja marítima de unos 350 kilómetros (GPM, 2016).

Su territorio ocupa extensas llanuras del litoral. De la provincia del Guayas viene la cordillera costanera del Chongón-Colonche que da origen a las montañas de Paján y Puca. Las elevaciones no sobrepasan los 1.200 metros sobre el nivel del mar. En el cantón Montecristi existen cordones aislados de los cerros de este nombre y los cerros de Hojas-Jaboncillo. Hacia el norte se dirige la Cordillera de Balzar, que comprende los cerros de Los Liberales y de Canoa; de allí sigue un ramal que se une con los cerros de Jama y se continúan hacia el norte con los cerros de Coaque, el Cerro Pata de Pájaro, uno de los más altos de La Provincia de Manabí con 845 m.s.n.m., continúan hacia el Norte las Montañas de Cojimíes y las montañas de Mache-Chindul.

En el territorio manabita habitan 1'369.780 personas, según el último censo nacional (2010), siendo la tercera provincia más poblada del país después de Guayas y Pichincha.

Es uno de los más importantes centros administrativos, económicos, financieros y comerciales del Ecuador. Las actividades principales de la provincia son el comercio, la ganadería, la industria y la pesca ya que se encuentra el segundo puerto más importante del país y las mayores fábricas de atún en Manta, el sector agropecuario en la vida rural; y, el turismo, principalmente en sus extensas playas.

La provincia de Manabí posee un elevado potencial solar durante todo el año; existe un determinado nivel de potenciales hidráulicos en sus ríos y tiene un desarrollo económico basado en la agricultura, ganadería y pesca, que pueden constituir fuentes de generación de residuales que se pueden utilizar como fuentes alternativas de energía, permitiendo fortalecer el desarrollo a escala local con recursos propios, reduciendo el consumo de recursos naturales y disminuyendo las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Rodríguez, 2015).

La provincia cuenta con el 7,59% de población rural sin electrificar, que la ubica por encima de la media del país, siendo necesario aprovechar esta brecha para potenciar el desarrollo energético local con la nueva visión de generación distribuida sustentada en la utilización de recursos endógenos (Rodríguez & Washington, 2015). En estos casos la energía renovable no depende del complicado e ineficiente sistema centralizado

para el suministro de energía, siendo necesaria la búsqueda de soluciones energéticas con fuentes limpias en el modo de la generación distribuida y con ello dar pasos en la mitigación de los efectos del cambio climático en zonas necesitadas.

En Ecuador se ha desplegado una nueva visión que se refleja en los objetivos del programa nacional para el buen vivir (SENPLADES, 2013), que pretende la realización del cambio de matriz energética y productiva enfocada al respeto ambiental, pero aún no es suficiente para detener los efectos negativos en términos energéticos y dicha política sigue teniendo un sesgo centralizado en la generación y distribución de energía, lo que limita las posibilidades de los territorios para administrar y utilizar sus recursos endógenos como parte de una política de desarrollo local adecuada, que se enfoque en lograr la autosuficiencia energética de los territorios.

El objetivo de la investigación se enfoca en ofrecer un análisis sobre la contribución del desarrollo energético local a la mitigación de los efectos del cambio climático, tomando como paradigma el aprovechamiento de recursos energéticos endógenos bajo los criterios técnicos de lograr una adecuada combinación de la generación distribuida y el tradicional sistema de generación centralizada, dirigido al mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad.

## II. MÉTODO

El método básico de la investigación se sustentó en el razonamiento inductivo, que permitió partir de determinadas premisas particulares, para obtener como conclusión una premisa general que permita demostrar la viabilidad de combinar determinadas alternativas energéticas a nivel local con el tradicional sistema centralizado de servicio energético, con el fin de alcanzar un desarrollo coherente con el respeto ambiental. La investigación se apoya en la revisión bibliográfica de diversos artículos científicos y datos de instituciones del Ecuador, que permiten llegar a conclusiones precisas sobre el tema que se estudia.

Las conclusiones obtenidas se proyectan en función de la planeación territorial energética, teniendo en cuenta los elementos espaciales que intervienen en el medio, para lograr la sostenibilidad de los territorios bajo las premisas del desarrollo local sostenible, para lo cual resulta importante considerar las acciones que se realicen en el sector energético, enfocadas en fortalecer la resiliencia territorial frente al cambio climático.

## III. RESULTADOS

### ANTECEDENTES DEL DESARROLLO ENERGÉTICO LOCAL.

Conceptualmente el desarrollo energético local no resulta un tema nuevo, pues su origen está vinculado al desarrollo de las primeras sociedades humanas. Desde el surgimiento del hombre y durante milenios no contó el hombre con otra fuente de energía utilizable inmediatamente que no fuese su propia musculatura para cazar, pescar, machacar granos alimenticios, transportar cargas y otras tareas vitales. Pero había algunas tareas importantes para cuya realización pudo contar el hombre con el auxilio de una fuente adicional de energía: las ramas y hojas secas de los árboles. Porque desde tiempo inmemorial dominaba la técnica de extraer la energía acumulada en la madera y los residuos vegetales secos, quemándolos para hacer fuego a voluntad (Altshuler & Colectivo de autores, 2004).

Se ha calculado que, en las condiciones mencionadas anteriormente, cuando el ser humano no disponía de otras fuentes de

energía que la que podían suministrar su propio cuerpo y la leña, el consumo energético promedio era de unos 5,8 kWh/día, de las cuales, alrededor de dos mil correspondían al uso del fuego, es decir, a la conversión en calor y luz de la energía química liberada por combustión rápida de la madera y algunos residuos vegetales (Altshuler & Colectivo de autores, 2004).

La gran revolución técnica que fue la agricultura le permitió al hombre almacenar la energía solar y transferirla a vegetales utilizables. En algún momento el hombre puso a tirar del arado a algunos animales domesticados en lugar de hacerlo él mismo y a emplearlos para arrastrar trineos o carros, con la ventaja que los animales utilizados podían desarrollar de cuatro a diez veces más potencia muscular que un hombre. Se ha estimado que en la sociedad del neolítico, el consumo energético medio del ser humano, ayudado en sus labores por la utilización de algunos animales domesticados y del fuego, llegó a ser tres veces mayor que el característico de la anterior fase cazadora y recolectora, esto es, unos 13,9 kWh/día (Altshuler & Colectivo de autores, 2004).

Con el tiempo, los procesos metalúrgicos llegaron a tener un apreciable impacto en el consumo de energía, que durante siglos procedió esencialmente de la combustión de la madera. Con el paso de los siglos se desarrollaron los medios de transporte sobre lagos, ríos y mares, y se utilizó ampliamente el viento combinado con la muscular humana auxiliada por remos para impulsar las barcas. Comenzó a utilizarse también la energía hidráulica para fines productivos. Esta energía, ya fuese por caída del agua en movimiento o por su impacto sobre los álabes de una rueda de madera, se empleaba para hacer girar las piedras o muelas con que se molía el grano, destinado fundamentalmente a la elaboración de pan (Altshuler & Colectivo de autores, 2004).

Con el concurso de la energía hidráulica, la de origen animal y la procedente de la combustión de la madera se desarrollaron la minería, la metalurgia y variadas actividades industriales. Entre los siglos XII y XVI no solo se construyeron las impresionantes edificaciones góticas, sino que florecieron invenciones ingeniosas como la pólvora, inventada por los chinos e introducida en Europa por los árabes, que la usaban como arma de guerra (Montesino, 2010).

Se estima que hacia el año 1400, es decir, entre fines de la Edad Media y comienzos del Renacimiento, el consumo energético per cápita era de unos 30,2 kWh/día. De ellas, aproximadamente 23 % correspondía a la alimentación, 46 % a las labores domésticas, el comercio y otros servicios; 27 % a la agricultura y la industria, y 4 % al transporte (Altshuler & Colectivo de autores, 2004). En la figura 1 se muestra la relación existente en el consumo de energía per cápita por actividades.

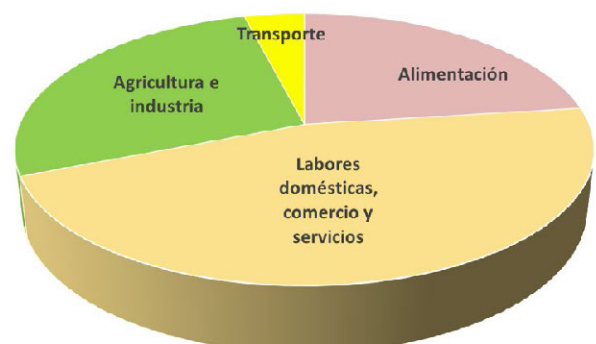


Figura 1. Consumo de energía per cápita por actividades.

La actividad derivada del desarrollo social fue imponiendo un incremento gradual de la demanda de energía y como consecuencia a partir del siglo XVII se produjo una aguda escasez de madera en Europa occidental, sobre todo en las islas británicas, donde para la realización de las actividades industriales que se servían de la energía térmica hubo que empezar a quemar hulla. Esta fuente energética fue el combustible por excelencia en los países más desarrollados, hasta que cedió esta condición al petróleo, bien entrado el siglo XX y es cuando comienzan a tener auge la extensión de los sistemas centralizados de energía, dejando a un lado los tipos de soluciones vinculadas al desarrollo local mediante el aprovechamiento de los recursos endógenos (Washington & Rodríguez, 2015).

Actualmente la generación de electricidad básica del Ecuador es de origen hidroeléctrica, que resulta más eficiente y menos costosa; pero en la medida que los centros de consumo se alejan de los centros de generación, el efecto es inverso. Esta situación supone que en la región Sierra el costo de la generación y suministro de energía hidroeléctrica sea relativamente bajo, pero esa misma energía llevada a la región costera sea ineficiente y con un costo elevado (Vázquez & Washintog, 2015).

El desarrollo energético local está llamado a romper con los tradicionales conceptos de la ineficiente y costosa generación centralizada de energía, perfilando la acción en lograr una adecuada combinación entre el sistema centralizado de suministro de electricidad, con el aprovechamiento de los recursos energéticos endógenos con que cuentan los territorios, logrando un esquema energético sostenible ajustado a las características de cada territorio (Vázquez & , 2015).

#### LAS TRANSICIONES ENERGÉTICAS VS DESARROLLO LOCAL.

Los países desarrollados han efectuado dos grandes transiciones energéticas vinculadas con la introducción de nuevas tecnologías que impulsaron un incremento exponencial de la demanda energética (Altshuler & Colectivo de autores, 2004):

- I. La primera entre 1760 y 1830 asociada a la primera revolución industrial, cuando se desarrollaron tecnologías como la máquina de vapor, el ferrocarril y las máquinas textiles y se produjo el tránsito de la madera y el carbón vegetal al carbón mineral;
- II. La segunda transición del carbón mineral al petróleo, vinculada con la segunda revolución industrial, que tuvo lugar entre 1860 y 1930, período en que se introdujeron los sistemas eléctricos, la aviación y la siderurgia.

Ambas transiciones presentan una característica común: el nuevo portador empleado era de mayor densidad energética que su predecesor y, por tanto, más competitivo que éste desde el punto de vista económico. En la figura 2 se muestra la relación gráfica de la densidad energética relativa de los portadores primarios que participaron en las dos transiciones energéticas.

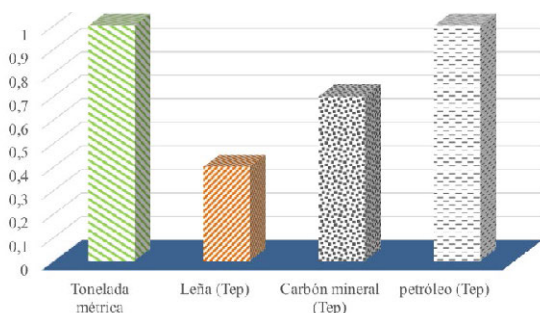


Figura 2. Densidad energética relativa de los portadores primarios

En ambas transiciones primó la escasez local de los portadores requeridos, así como la comodidad en su manipulación y almacenamiento, pero a pesar de contar con ese poderoso mecanismo a su favor, costó varias decenas de años el proceso de toma del mercado por el nuevo portador.

A partir del empleo del petróleo como portador energético por excelencia en la segunda mitad del siglo XIX, se incrementó rápidamente su participación en el mercado mundial de energía primaria y alrededor de 1970 constituía la base del primer sistema global de suministro energético. Ese dominio del mercado es una de las causas fundamentales de la actual situación, en la que el precio de los hidrocarburos determina la competitividad de los portadores alternativos y sus tecnologías asociadas, por lo que se constituye en el energético de referencia (Altshuler & Colectivo de autores, 2004).

A partir del año 1860 con la segunda transición energética donde se comienza a utilizar una fuente más concentrada, empieza la introducción gradual de los sistemas centralizados de energía, que tendrán su mayor auge a partir de la primera mitad del siglo XX y poco a poco fueron quedando atrás los tipos de soluciones vinculadas al desarrollo local mediante el aprovechamiento de recursos energéticos endógenos (Montesino, 2010).

#### IMPACTOS AMBIENTALES

En el mundo actual la interacción humanidad-ambiente tiene un carácter global y las tendencias indican su incremento creciente. De todas las formas de actividad humana quizá la más contaminante y degradante sea la relativa al manejo de los recursos energéticos fósiles, es decir, su extracción, producción, transporte y consumo. Esto ocurre porque los ecosistemas surgen en la naturaleza con un determinado equilibrio energético. Si se rompe o altera ese equilibrio, las condiciones de mantenimiento del ecosistema se modifican. Al sobrepasar los límites superior o inferior de balance de energía que permiten la existencia del ecosistema (resiliencia), éste degenera y corre el peligro de desaparecer si el automatismo del sistema (homeostasis) no le permite restaurar las condiciones de equilibrio. El uso de la vía energética dura por encima del aprovechamiento de los recursos endógenos, se sustenta en un sistema de valores que se justifican a sí mismos, es decir: dominación, competencia, explotación, desarrollo desigual, violencia, etc., todos tendientes a elevar la ganancia económica, sin reparo de las condiciones ambientales (Montesino, 2010).

Una de las características esenciales de los impactos provocados por el sistema energético contemporáneo es la interacción de fenómenos de diversos tipos que ocasionan diversos tipos de problemas ambientales, económicos, sociales, políticos, etc. Es necesario verlos, por tanto, en su integralidad desde la perspectiva de la relación medio ambiente-desarrollo (Washington & Rodríguez, 2015).

En primer lugar, la combustión de carbón, petróleo y gasolina es el origen de buena parte de los contaminantes atmosféricos que producen distintos efectos sobre el medio ambiente. Se ha podido comprobar que la contaminación ocasionada por las emisiones de gases contaminantes, de metales pesados en suspensión resultantes de la combustión de hidrocarburos, tanto de las plantas de generación eléctrica y las industrias como de los automóviles y hogares constituye una de las causas principales de enfermedades de las vías respiratorias, la piel y diversos tipos de cáncer (Washintong & Rodríguez, 2015).

Otro de los efectos es lo que se conoce como cambio climático global. Cada vez con mayor frecuencia se escuchan noticias sobre sucesos catastróficos del presente que indican que las zonas climáticas se están desplazando, los glaciares se están descongelando y el nivel de los océanos se eleva. Estos acontecimientos de orden meteorológico han alertado a la comunidad internacional, la cual ve en ellos una amenaza futura para el desarrollo económico y la preservación de las condiciones ambientales necesarias con vistas a mantener las distintas formas de vida sobre la Tierra, tal como hoy son concebidas (Saltos & Colectivo de autores, 2017).

En la atmósfera existen concentraciones naturales de distintos gases de efecto invernadero (GEI). El CO<sub>2</sub>, el metano y los cloro flouro carbonados (CFCs) recalientan la atmósfera al reabsorber el calor radiado por la superficie terrestre; por ello, mientras mayor sea la concentración de estos gases mayor será la temperatura del aire en la troposfera, o sea sobre la Tierra. El efecto invernadero resultante, que permite la entrada de la energía solar, pero reduce la reemisión de rayos infrarrojo al espacio exterior, genera una tendencia al calentamiento que podría afectar el clima global y llevar al deshielo de los casquetes polares (Montesino, 2010).

El calentamiento global ya está ocurriendo y aunque algunos lo niegan increíblemente, es una realidad palpable. De mantenerse la tendencia experimentada en los últimos años, puede estar ocurriendo un cambio de temperatura global en la atmósfera de la Tierra, que tendría como consecuencias la muerte de bosques, tormentas violentas y sequías, el deshielo del océano Ártico durante todo el año, el aumento del nivel del océano mundial, la disminución de las tierras emergidas, el hundimiento de ciudades litorales, y se secaría el cinturón productor de cereales y los campos de trigo de las estepas, lo que unido al hundimiento de las tierras bajas pudiera propiciar la pérdida de 1/3 de las tierras agrícolas (Altshuler & Colectivo de autores, 2004).

Otro efecto de las emisiones de contaminantes a la atmósfera producto de la combustión es el de las precipitaciones ácidas en forma de lluvia o neblina. Más de 80% del dióxido de azufre, 50% de los óxidos de nitrógeno, y de 30 a 40% de las partículas en suspensión emitidos a la atmósfera proceden de las centrales eléctricas que queman combustibles fósiles, las calderas industriales y las calefacciones. Estos contaminantes son transportados por el viento y las nubes, y producen efectos adversos en áreas muy distantes del lugar de la emisión en forma de depósito o de lluvias ácidas (Altshuler & Colectivo de autores, 2004).

Según datos de organismos internacionales, las lluvias ácidas han aumentado en diez veces desde 1970 (Altshuler & Colectivo de autores, 2004). La acidez relativa de muchos lagos y embalses de agua dulce se ha visto alterada hasta tal punto que han quedado destruidas poblaciones enteras de peces y otras especies; como consecuencia de las escorrentías y filtraciones estas aguas ácidas van a parar a las cuencas subterráneas, las contaminan y las hacen inservibles o dañinas para el consumo humano. Asimismo, las concentraciones de vapores ácidos producen numerosos perjuicios a la salud, sobre todo en las áreas urbanas donde sus concentraciones suelen ser mayores.

Las lluvias ácidas tienen un notable efecto defoliante y es la causa de la desaparición de extensas zonas boscosas, fundamentalmente en el hemisferio Norte. Tiene como agravante que la acidez de suelos es acumulativa y prácticamente no se elimina, lo que hace virtualmente inservibles los suelos para procesos de reforestación. El impacto que esto produce sobre

la biota en general es incalculable. Las emisiones de dióxido de azufre y la formación de ácido sulfúrico son también responsables del ataque sufrido por las calizas y el mármol a grandes distancias. Se ha podido apreciar su efecto corrosivo sobre materiales de construcción, edificios, equipos industriales, monumentos y joyas arquitectónicas de la antigüedad (Altshuler & Colectivo de autores, 2004).

Otro de los impactos está relacionado con la contaminación de los mares y océanos. Las descargas accidentales y a gran escala de petróleo líquido, son una importante causa de contaminación de las costas. Los casos más espectaculares de contaminación por crudos suelen estar a cargo de los supertanqueros empleados para transportarlos; pero hay otros barcos que vierten también petróleo, y la explotación de las plataformas petrolíferas marinas supone, asimismo, un importante aporte de vertidos. Se estima que de cada millón de toneladas de crudo embarcadas se vierte una tonelada. Esto trae como consecuencia daños de consideración a la flora y la fauna del mar y los ecosistemas costeros. Todos los años se cuantifican miles de peces, aves y mamíferos muertos por las llamadas "mareas negras" y son incalculables los daños a otras especies de ecosistemas que resultan sensibles, como los arrecifes coralinos, manglares y marismas (Montesino, 2010).

En el orden económico son cuantiosas las pérdidas que los derrames ocasionan a la pesca y el turismo. La contaminación térmica de la mar provocada por las centrales termoeléctricas, se debe a la elevación de la temperatura que experimenta el agua de mar al ser utilizada como refrigerante. Aunque esta contaminación tiene efectos variables en dependencia de la potencia de la instalación, se ha comprobado el daño que produce sobre el fitoplancton, el zooplancton y otros organismos.

Aunque la producción de energía no es la causa principal de la deforestación y la degradación de los suelos, sí contribuye a ello en algunas regiones del planeta, tanto por la devastación de bosques para la prospección y explotación petrolera, como para la obtención anárquica de energía de biomasa ante la imposibilidad de otras alternativas. En la tabla 1 se muestran los contaminantes y sus fuentes principales.

**TABLA I.**  
CONTAMINANTES Y SUS FUENTES PRINCIPALES

CONTAMINANTES	FUENTES DE ORIGEN
Monóxido de carbono (CO)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gases de escape de los vehículos de motor</li> <li>• Algunos procesos industriales que utilizan</li> </ul>
Dióxido de azufre (SO <sub>2</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Instalaciones generadoras de calor y electricidad que utilizan petróleo o carbón con contenido sulfurado.</li> </ul>
Partículas en suspensión	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gases de escape de vehículos de motor;</li> <li>• Procesos industriales;</li> <li>• Incineración de residuos;</li> <li>• Generación de calor y electricidad y;</li> <li>• Reacción de gases contaminantes en la atmósfera.</li> </ul>
Plomo (Pb)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gases de escape de vehículos de motor;</li> <li>• Fundiciones de plomo;</li> <li>• Fábricas de baterías</li> </ul>
Óxidos de nitrógeno (NO, NO <sub>2</sub> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gases de escape de vehículos de motor;</li> <li>• Instalaciones generadoras de calor y electricidad;</li> <li>• Ácido nítrico;</li> <li>• Explosivos;</li> <li>• Fábrica de fertilizantes.</li> </ul>
Hidrocarburos no metánicos (incluye etano, etileno, propano, butanos, pentanos, acetileno).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gases de escape de vehículos de motor;</li> <li>• Evaporación de disolventes;</li> <li>• Procesos industriales;</li> <li>• Eliminación de residuos sólidos;</li> <li>• Combustión de combustibles y;</li> <li>• Todas las fuentes de combustión.</li> </ul>

## OTROS IMPACTOS ASOCIADOS

Además del impacto ambiental, el sistema energético contemporáneo ocasiona también problemas en el orden económico, político y social a escala global de los cuales el Ecuador no escapa.

La dependencia casi exclusiva de estos esquemas energéticos basados en las energías fósiles ocasiona, por una parte, frecuentes convulsiones económico-financieras cuando por diversas razones los precios del petróleo suben o bajan, vaivenes en el precio que, por supuesto, afectan a todos los países del Tercer Mundo, tanto los que no son productores del crudo, como aquellos que sustentan una parte de su economía en la gestión petrolera (Montesino, 2010).

El nivel de inversiones en recursos energéticos a escala mundial es aproximadamente de 750 billones de dólares (Altshuler & Colectivo de autores, 2004). Semejante nivel es insostenible para los países subdesarrollados, lo que los obliga a un endeudamiento creciente y crónico. Para pagar la deuda muchos países subdesarrollados se han visto forzados a expropiar los recursos naturales al máximo, aumentando así el costo ambiental del endeudamiento. Este deterioro ambiental en los países subdesarrollados, a su vez, agudiza los problemas sociales de pobreza, desnutrición, desempleo, insalubridad y analfabetismo, y hace aún más abismal el desarrollo desigual. Por otro lado, estos países quedan relegados en su función de exportadores de materias primas.

La especialización que promueven las políticas neoliberales comprometidas a un crecimiento económico continuo, están encaminadas hacia la máxima explotación de las riquezas naturales de los países en desarrollo, provocan agotamiento y destrucción de los recursos y aumentan los costos del crecimiento económico dado el descenso de la productividad natural de dichos recursos.

El control de los recursos energéticos fósiles es la causa de innumerables conflictos geopolíticos del mundo contemporáneo, atendiendo al carácter estratégico que tienen para el funcionamiento y existencia de la sociedad de consumo. No es casual que extensas zonas petroleras sufran la presencia de bases militares de las potencias imperialistas, en particular de los Estados Unidos (Montesino, 2010).

Desde la Cumbre de Río en 1992 quedó claramente establecida la relación medio ambiente-desarrollo, en el sentido de que la protección ambiental no puede significar la preservación de la pobreza y el subdesarrollo y que la búsqueda del desarrollo no puede significar la destrucción del ecosistema terrestre, por lo que se reclama la necesidad de adoptar modelos y procesos de desarrollo que sean sostenibles, lo que será muy difícil de lograr siguiendo los tradicionales esquemas que describen una ruta lineal que invisibiliza la gestión local y el adecuado aprovechamiento de los recursos endógenos (Toala & Colectivo de autores, 2017).

El desarrollo sostenible debe ser entendido como un proceso de elevación de la calidad de vida del ser humano como objeto y sujeto del desarrollo, por medio del progreso económico equitativo sobre la base de métodos de producción y patrones de consumo que mantengan el equilibrio ecológico y garanticen la calidad de vida de las generaciones futuras. Cuando se habla de sostenibilidad se hace referencia a la preservación de los equilibrios que le dan sustento al bienestar social, el progreso económico, el enriquecimiento cultural y el crecimiento personal, lo que resulta difícil lograr mediante la práctica de los tradicionales esquemas de desarrollo, donde prevalece la gestión energética centralizada.

Las causas principales de los problemas ambientales son, de un lado la pobreza y el subdesarrollo, y en un proceso de transición hacia el desarrollo sostenible en las condiciones del mundo actual supone múltiples desventajas para los países pobres.

En cuanto a los países ricos, se plantea la necesidad de cambios fundamentales en los estilos de vida basados en el consumo desmesurado. A esta iniquidad contribuye de manera significativa el sistema energético contemporáneo. La agresión exportadora del sistema energético genera innumerables problemas y conflictos ambientales; son conflictos por el territorio, el suelo, los espacios físicos en los que se vive; por el agua, el aire puro, los desechos y la basura, los derrumbes, por los productos contaminantes, las enfermedades producidas por la contaminación; por la disminución del bosque nativo, de la flora y la fauna nacional es; en fin, por la sobreexplotación de los recursos naturales.

## LOS RECURSOS ENERGÉTICOS ENDÓGENOS

Las fuentes renovables de energía fueron los primeros portadores utilizados por el hombre para sustituir su fuerza corporal y la energía biológica de los animales que fueron domesticados a los efectos de aliviarlo en tareas engorrosas, difíciles y arriesgadas o que consumían mucho tiempo o esfuerzos; de esa manera, el hombre aprendió a aprovechar la fuerza del viento, la energía de los ríos y de las cascadas, la contenida en la leña, la madera y otros tipos de biomasa.

Esa etapa histórica puede caracterizarse por la baja eficiencia de las tecnologías empleadas en general, en buena medida consecuencia del incipiente desarrollo científico y tecnológico que prevalecía en ella, así como de la disponibilidad de los recursos en comparación con la intensidad de su empleo, todo lo que conformaba un entorno no urgido de luchar por una elevación constante de la eficiencia. Esas circunstancias ambientales que configuran los riesgos actuales derivados del cambio climático que ya ha comenzado a manifestarse de distintas formas, obligan a pensar en la sustitución acelerada de los combustibles fósiles para complementar el incremento constante en la eficiencia de su utilización, que viene produciéndose desde hace varias décadas, aunque no resulta suficiente para evitar los desastrosos efectos en marcha desencadenados por los elevados niveles de concentración ya alcanzados, cuya reversión demoraría decenios o tal vez siglos para hacerse patente, aún en el caso ideal de que pudieran dejarse de emitir de inmediato los gases de invernadero.

Es por ello que resulta necesario iniciar un proceso de reducción acelerada en el uso de los combustibles fósiles, combinando el aprovechamiento adecuado de recursos energéticos endógenos, en paralelo con el aumento de la eficiencia que puede lograrse mediante un grupo tecnologías modernas, sin dejar de considerar las medidas que en el orden organizativo y comportamental de la sociedad pueden lograrse; pero ello se requiere vencer barreras de todo tipo (financieras, económicas, tecnológicas, conductuales, conceptuales, psicológicas, políticas, regulatorias, etc.) que ahora se oponen a la adopción de un nuevo tipo de desarrollo que tenga su centro en la localidad y el aprovechamiento adecuado de los recursos endógenos.

El Sol es la única fuente externa de energía que llega al planeta y, aunque a escala cósmica el Sol es finito y no renovable, a escala terrestre es inagotable porque se espera que continúe enviándonos energía durante muchos miles de millones de años más. Del Sol se derivan todas las fuentes renovables de energía: hidráulica, biomasa, eólica, fotovoltaica, térmica solar, gradiente térmico oceánico (GTO), olas, corrientes marinas, etc.; el flujo solar se emite y llega a la Tierra con in-

dependencia de que se le emplee o no, así que las futuras generaciones no estarán más limitadas al usarlo porque lo aprovechemos ahora.

Las fuentes renovables de energía son las más sanas que existen desde el punto de vista ambiental, a pesar de que para el aprovechamiento de algunas de ellas el entorno puede ser perturbado en forma más o menos sensible, como es el caso de los vasos de las presas o el ruido de los aerogeneradores.

Si bien la utilización de las fuentes renovables de energía ha crecido significativamente durante los últimos años, su participación en el consumo mundial de portadores energéticos apenas rebasa 2,5 % del total, debido al bajo nivel de partida y su lento ritmo de penetración en el mercado, consecuencia combinada de varios factores, entre los que se destacan (Altschuler & Colectivo de autores, 2004):

- Necesidad de tecnologías eficientes para su aprovechamiento, que no existen o están en diversos estadios de desarrollo;
- Competencia desleal de los combustibles fósiles, cuyos precios no incluyen el valor de los daños ambientales ocasionados cuando se consumen, ni tienen en cuenta su carácter no renovable;
- Hábitos establecidos durante más de dos siglos, en que los portadores fósiles y en particular los combustibles líquidos derivados del petróleo, con grandes ventajas en su manipulación y alta densidad energética, se han utilizado de manera creciente;
- Estilos de vida derrochadores, basados en vehículos automotores para pocos pasajeros, cuyo funcionamiento depende fundamentalmente de los hidrocarburos;
- Tratamiento discriminatorio y peyorativo que tradicionalmente se da a las fuentes renovables como alternativas, auxiliares, complementarias, otras, unido a su carácter disperso o distribuido, su menor densidad energética y la poca comprensión del significado de su renovabilidad.

#### EL DESARROLLO LOCAL

El desarrollo local es una de las temáticas más relevantes en el campo del progreso socioeconómico en el siglo XXI y está contemplado entre los grandes retos para las actuales y futuras generaciones, pues se trata de redescubrir la dimensión territorial en función de priorizar las soluciones locales para enfrentar las nuevas exigencias en términos de eficiencia energética, productiva y competitividad, de manera que el tipo de desarrollo que más se conoce vaya abriendo paso a uno nuevo, más completo, más humano y respetuoso con el ambiente y sobre todo donde no se repitan los errores cometidos en periodos anteriores (Yuvey, 2010).

El esquema de desarrollo puesto en práctica en los últimos cien años en el campo de la energía, ha posibilitado el impulso del progreso tecnológico, el mundo se ha vuelto cada vez más pequeño y más cognoscible; pero al propio tiempo se han creado dos mundos: uno dotado de todo el desarrollo posible, donde están resueltas las necesidades y se pueden complacer los más especiales caprichos humanos; el otro mundo plagado de pobreza, y enfermedades, un mundo que se debate todos los días por la supervivencia contra el hambre, las enfermedades y la miseria. Estas son realidades que demuestran la necesidad de pasar a otros conceptos prácticos del desarrollo, donde el componente local con sus recursos pueda ser dueño de su propio destino social (Rodríguez & Washington, 2015).

Los sistemas de información geográfica (SIG) constituyen herramientas muy usadas en los momentos actuales, ya que permiten hacer estudios en el territorio de forma integrada,

posibilitando realizar múltiples estudios para una misma región, territorio o localidad, de forma que esta información genera nuevos datos que en muchos casos pueden apoyar estrategias para el desarrollo de interés local, provincial, nacional con potencialidad de repercutir en nuevos productos, planes o programas, de ahí su importancia para el desarrollo local (Saltos & Colectivo de autores, 2017).

La provincia de Manabí está ubicada en la zona del litoral del Ecuador. Según estudios realizados por la Universidad Eloy Alfaro (ULEAM), esta región por sus características socioeconómicas califica entre las siete más pobres del Ecuador, donde se puede apreciar como rasgo distintivo que: el 87,5% de los hogares poseen características físicas inadecuadas; el 28% de la población carece del abastecimiento de agua por la red pública; el 6,8% no dispone del servicio eléctrico; un 46,4% no poseen los servicios de alcantarillado; el 23% no cuenta con el servicio público de recogida de residuales; y un 26,6% no dispone del servicio telefónico (Rodríguez, 2015).

Las características de la provincia la hacen propicia para desarrollar un proyecto que sea dirigido al desarrollo local sostenible, con una visión energética aprovechando los recursos endógenos de la zona de estudio, implementado los SIG como herramientas para el estudio de los espacios territoriales y locales, así como la disponibilidad de recursos energéticos, de manera que se pueda gestionar financiamiento para el desarrollo y que la localidad se empodere de su destino energético.

Una de las causas que motiva el poco aprovechamiento de las fuentes renovables en la generación sostenible de energía a escala local, resulta el desconocimiento y la falta de información vinculada a las relaciones que tienen lugar entre el componente territorial y las energías renovables, impidiendo que se puedan considerar de manera integrada los elementos de la localidad, la situación ambiental, las tradiciones, la cultura y las necesidades que implica el desarrollo equilibrado y equitativo de las localidades, pues el desconocimiento de estos datos imposibilita la realización de estudios de factibilidad que puedan ser objetivos.

La visión de los decisores que trabajan en el campo de la energía sobre el territorio no siempre se corresponde en muchos casos, con la realidad física de recursos y con las relaciones de estos con el ambiente y la sociedad, los SIG pueden jugar un rol importante en ofrecer información espacial integrada con un conjunto de datos de la realidad objetiva y las posibilidades de su aprovechamiento en función del desarrollo local sostenible.

Desde el año 2015 se viene realizando en la Universidad Técnica de Manabí, un proyecto encaminado al estudio de los potenciales de fuentes renovables (Rodríguez, 2015) perfilado a ofrecer datos relevantes a nivel local, que posibilite la introducción y desarrollo de las fuentes renovables de energía. Como parte del proyecto se ha desarrollado información geográfica en mapas a escala cromática sobre el potencial solar y de viento. La información está enfocada a promover inversiones en pequeños sistemas conectados a la red o de sistemas autónomos para la electrificación rural. Con ello se persigue aprovechar los recursos endógenos a nivel local, propiciando el ahorro de combustibles, la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuir las pérdidas y crear espacios técnicos con una alta eficiencia energética.

En la figura 3 se muestra el mapa del potencial solar promedio anual y en la figura 4 el mapa del potencial de viento elaborados a escala cromática, ambos de la provincia de Manabí donde se especifica el resultado de un estudio realizado en los cantones del municipio de Chone, de manera que, con solo

realizar una inspección visual sobre el documento, se logra formar una idea bien aproximada de los potenciales de energía solar y de viento que inciden en el territorio.

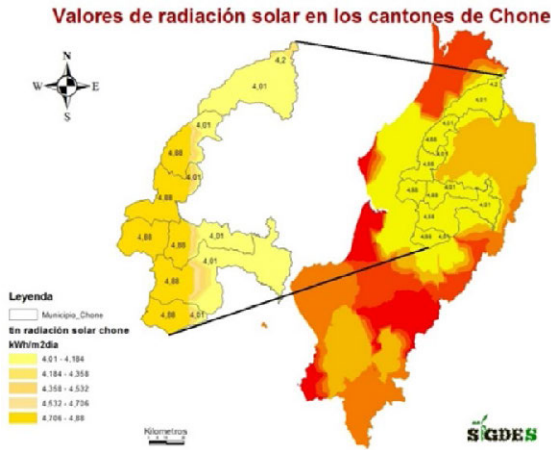


Figura 3. Mapa del potencial solar promedio anual de la provincia de Manabí y el municipio Chone.  
Fuente: (Rodríguez, 2015)

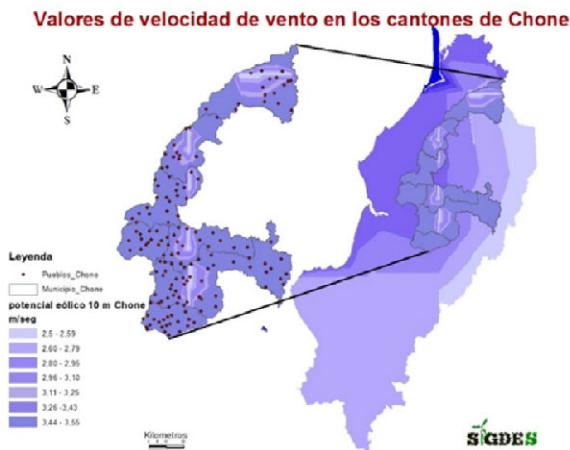


Figura 4. Mapa del potencial de viento de la provincia de Manabí y el municipio Chone.  
Fuente: (Rodríguez, 2015)

Actualmente se desarrollan varios estudios relacionados con el potencial hidráulico que existe en los ríos de la provincia y se prevé desarrollar el mapa de este potencial, de manera que se pueda valorar el aprovechamiento de dicho recurso endógeno, con tecnologías que permitan realizar el aporte a la red para la electrificación de viviendas y comunidades aisladas.

#### IV. CONCLUSIONES

1. El trabajo logra mostrar un análisis relacionado con la contribución que puede ofrecer el desarrollo energético local a la mitigación de los efectos del cambio climático, partiendo del aprovechamiento de los recursos endógenos bajo el criterio de lograr la combinación de la generación distribuida y el tradicional sistema de generación centralizada, dirigido al mejoramiento de la calidad de vida de la sociedad.
2. Se logra argumentar la necesidad de transitar de un sistema centralizado que privilegia el formato técnico de grandes centrales generadoras, con complejos sistemas de transportación y distribución, a uno que considere

el aprovechamiento gradual de los recursos endógenos para la generación de electricidad en el modo de la generación distribuida, que logre disminuir el consumo de recursos naturales, que reduzca las pérdidas, que incremente la eficiencia, que propicie la disminución de las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y logre mejorar la calidad del servicio eléctrico.

#### AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Universidad y a sus administrativos por permitir realizar la investigación.

#### REFERENCIAS

- Althuler, J., & Colectivo de autores. (2004). Energía. Suplemento Especial de Energía CUBAENERGÍA, Editorial Academia.
- GPM, (2016). Datos geográficos. Gobierno Provincial de Manabí (GPM). Consultado el 6 de mayo de 2017. Disponible en: <http://www.manabi.gob.ec/datos-manabi/datos-geograficos>.
- INOCAR, (2012). Información general de la república del Ecuador. Consultado el 10 de mayo de 2017. Disponible en: [https://www.inocar.mil.ec/docs/derrotero/derrotero\\_cap\\_I.pdf](https://www.inocar.mil.ec/docs/derrotero/derrotero_cap_I.pdf).
- Montesino, L. R. A. (2010). Solarización Territorial. Vía para el logro del desarrollo sostenible. CUBASOLAR. ISBN: 978-959-7113-39-3, La Habana, Cuba.
- Rodríguez, G. M. (2015). SIGDES. Facultad de Ciencias Matemática, Física y Química de la Universidad Técnica de Manabí, Sistema de Información para el Desarrollo Energético Sostenible.
- Rodríguez G. M. (2012). La Ordenación y la Planificación de las Fuentes Renovables de Energía en la Isla de Cuba, desde una perspectiva territorial. Estudio de caso en el municipio Guamá a partir de un Geoport. ISBN. 978-84-7834-689-9. Editorial CIEMAT. España.
- Rodríguez, G. M., & Washington, C. J. (2015). Factibilidad económica de la extensión de la red eléctrica (comunidades rurales de Chone). XXX Seminario Nacional del Sector Eléctrico. Riobamba 15, 16 y 17 de abril de 2015, AC.5.1. Sostenibilidad de proyectos en energías renovables en sistemas aislados.
- Salto, A. W. M., & Colectivo de autores. (2017). Sistemas de información geográfica y microrredes Revista Cubana de Ingeniería. Vol. VIII, No. 1, enero - abril, 2017, pp. 00 - 00, ISSN 2223 -1781.
- SENPLADES. (2013). Plan Nacional del Buen Vivir. 2013-2017. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo. Gobierno de Ecuador, ISBN-978-9942-07-448-5.
- Toala, A. G., & Colectivo de autores. (2017). Climatization. Energy Efficiency and Environmental Protection. IRJEIS. International Research Journal Of Engineering, IT E Scientific Research, Vol. 3 Issue. 2: March 2017. ISSN: 2454-2261. Impac Factor: 5.211.
- Vázquez, P. A., & Washintog, C. J. (2015). La energía solar en la provincia de Manabí y el déficit de un marco regulatorio adecuado. XXX Seminario Nacional del Sector Eléctrico. Riobamba 15, 16 y 17 de abril de 2015, Área A C. 2 Regulación del sector eléctrico y aspectos legales. AC.2.1. Análisis del nuevo marco legal del sector eléctrico ecuatoriano.
- Washintog, C. J., & Rodríguez, G. M. (2015). Impacto ambiental de las redes eléctricas próximas al litoral manabita. XXX Seminario Nacional del Sector Eléctrico. Riobamba 15, 16 y 17 de abril de 2015, GT3.2 Mantenimiento en Sistemas de Transmisión.
- Yuve, M. P. (2010). Elementos sustanciales del desarrollo local. Observatorio Iberoamericano del Desarrollo Local y la Economía Social (OIDLES), Revista OIDLES - Vol 4, N° 8 (junio 2010).





# Métodos y análisis con Tecnologías de la Información Geográfica



# Análise de tendência sazonal de série temporal de EVI (Índice de Vegetação Realçado) na bacia do Rio Pardo – SP – Brasil por meio da ferramenta Earth Trends Modeler

Demarchi, Julio Cesar<sup>1</sup>, Fuzzo, Daniela Fernanda da Silva<sup>2</sup>, Piroli, Edson Luís<sup>3</sup>

1 Programa de Pós-Graduação em Geografia/Faculdade de Ciências e Tecnologia/Universidade Estadual Paulista - UNESP  
Rua Roberto Simonsen, 305 - Presidente Prudente/São Paulo/Brasil  
julio.demarchi@gmail.com

2 Curso de Geografia/Câmpus de Ourinhos/Universidade Estadual Paulista - UNESP  
Avenida Renato da Costa Lima, 451 - Ourinhos/São Paulo/Brasil  
silva.danielaf@gmail.com

3 Curso de Geografia/Câmpus de Ourinhos/Universidade Estadual Paulista - UNESP  
Avenida Renato da Costa Lima, 451 - Ourinhos/São Paulo/Brasil  
piroli@ourinhos.unesp.br

## RESUMO

Os fenômenos ambientais apresentam variabilidades e tendências sazonais e interanuais decorrentes de processos e causas naturais e das alterações produzidas pelo homem na superfície terrestre. O objetivo deste trabalho foi realizar a análise de tendência sazonal e interanual da série temporal de imagens do Índice de Vegetação Realçado (EVI) do satélite MODIS na bacia do Rio Pardo, São Paulo, Brasil, no período de 2001 a 2016, por meio da técnica Seasonal Trends Analysis, disponível na ferramenta Earth Trends Modeler do SIG Idrisi Taiga, para detectar tendências sazonais e interanuais no ciclo das culturas agrícolas e dos demais usos da terra. Foi realizada a análise de regressão harmônica em cada pixel das imagens da série temporal para extrair imagens dos parâmetros de forma Amplitude 0 (índice médio anual), Amplitude 1 e Fase 1 (ciclo anual), Amplitude 2 e Fase 2 (ciclo semianual). Em seguida, a tendência da série temporal foi analisada pelo operador de declividade mediana Theil-Sen e calcularam-se os parâmetros de significância Mann-Kendall p e Z. Os parâmetros de forma, as curvas sazonais ajustadas e observadas, os períodos 40 % green-up e 40 % green-down de cada classe de uso da terra e os parâmetros de significância evidenciaram a tendência de aumento de EVI ao longo do ano no final da série temporal em todas as classes de uso da terra, com exceção das culturas anuais e zonas urbanas, o aumento da duração do período verde e a existência de tendência em 28,8 % da área de estudo a  $p < 0,001$ .

Palabras clave: **tendência sazonal, tendência interanual, regressão harmônica, parâmetros de forma, uso da terra.**

## ABSTRACT

*The environmental phenomena present seasonal and inter-annual variability and trends resulting from natural processes and causes and the man-induced changes over the Earth surface. This paper aims to perform the seasonal and inter-annual trend analysis of the time series of MODIS Enhanced Vegetation Index (EVI) images in Pardo river basin, located in São Paulo State, Brazil, from 2001 to 2016, by means of the "Seasonal Trends Analysis" technique, available in the Earth Trends Modeler tool of the GIS Idrisi Taiga, in order to detect seasonal and inter-annual trends in the cycle of agricultural crops and the other land uses. A harmonic regression analysis was performed in each cell of the time series to extract shape parameters images, such as Amplitude 0 (mean annual index), Amplitude 1 and Phase 1 (annual cycle), Amplitude 2 and Phase 2 (semi-annual cycle). Subsequently, the trend of the time series was analyzed by the median slope operator Theil-Sen and the Mann-Kendall p and Z significance parameters were calculated. The shape parameters, the adjusted and observed seasonal curves, the 40% green-up and 40% green-down periods of each land use class and the significance parameters evidenced an increase in EVI over the year at the end of the time series in all land use classes, with the exception of annual crops and urban areas, the increase in the duration of the green period and the existence of a trend in 28.8% of the study area at  $p < 0.001$ .*

tude 1 and Phase 1 (annual cycle), Amplitude 2 and Phase 2 (semiannual cycle). Then, the time series trend was analyzed by the Theil-Sen median slope operator and both *p* and *Z* Mann-Kendall significance parameters were calculated. The shape parameters, the adjusted and observed seasonal curves, the 40% green-up and 40% green-down periods of each land use class and the significance parameters demonstrated the increasing trend of EVI during the whole year by the end of the time series in all land use classes, except for annual crops and urban areas, besides the increasing length of the green period and the existence of trend in 28.8% of the study site at  $p < 0.001$  significance.

**Keywords:** *seasonal trend, inter-annual trend, harmonic regression, shape parameters, land use.*

## I. INTRODUÇÃO

Os fenômenos ambientais apresentam variabilidades e tendências sazonais e interanuais, decorrentes de variações no ciclo de radiação solar global e das alterações produzidas pelo homem na superfície da Terra. As ditas mudanças climáticas globais têm efeitos diretos sobre a agricultura, os recursos hídricos, as florestas, os ecossistemas e, conseqüentemente, sobre a economia, a política e a qualidade de vida da população.

O estudo da fenologia da vegetação tem despertado interesse da comunidade científica nos últimos anos como indicador das mudanças climáticas, dada a sensibilidade da dinâmica da vegetação às variáveis climáticas. Como a detecção de dados fenológicos em campo demanda muito trabalho, tem sido frequente o uso de produtos de sensoriamento remoto orbital para o seu estudo em diversas escalas, como os índices de vegetação (Eastman, Sangermano, Machado, Rogan, & Anyamba, 2013).

Embora o índice de vegetação mais conhecido e utilizado seja o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada (NDVI), ele apresenta algumas desvantagens, como a não linearidade e problemas de escala, a saturação em condições de alta biomassa das folhas da vegetação e sensibilidade à reflectância do solo em condições de vegetação esparsa. Nesse sentido, o satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) disponibilizou o Índice de Vegetação Realçado (Enhanced Vegetation Index, EVI), concebido para ampliar a sensibilidade das medidas em biomas densamente florestados e áreas agrícolas, reduzindo o efeito do substrato abaixo do dossel e as fontes de ruídos de aerossóis. Este índice é mais sensível ao aumento da densidade da cobertura vegetal e aos parâmetros estruturais do dossel, como o Índice de Área Foliar (Justice et al., 1998). O índice EVI é dado pela equação [1].

$$EVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (L + \rho_{nir} + C_1\rho_{red} - C_2\rho_{blue}) \quad (1)$$

Onde:  $\rho_{nir}$  é a reflectância no canal infravermelho próximo;  $\rho_{red}$  a reflectância no comprimento de onda do vermelho;  $\rho_{blue}$  a reflectância no comprimento de onda do azul; *L* é o fator de correção para o substrato do dossel que modela a transmitância da radiação no comprimento de onda vermelho e infravermelho próximo através do dossel;  $C_1$  e  $C_2$  são os coeficientes que usam a banda do azul para corrigir os efeitos dos aerossóis na banda do vermelho (Justice et al., 1998).

Como os índices de vegetação são sensíveis a seus parâmetros biofísicos, eles constituem indicadores efetivos das mudanças ambientais globais, como as mudanças climáticas. Na região Sudeste do Brasil, onde se localiza o estado de São Paulo, há a tendência de aumento das chuvas intensas em até 120 mm por década, mas as chuvas se tornarão irregulares devido à diminuição da umidade proveniente da Amazônia, principalmente no período seco. Estudos publicados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas da Organização das Nações Unidas (IPCC/ONU) apontam quedas de 30 % na

produtividade agrícola da América Latina até 2080 devido às mudanças climáticas, afetando aproximadamente 50 % das terras aráveis até 2050 em razão da desertificação e da salinização. Pesquisas simulando aumentos de temperatura de 1 a 5,8°C no Brasil identificaram riscos agroclimáticos em culturas como feijão, arroz, soja, algodão, milho e cana-de-açúcar, com reduções consideráveis na produtividade e na área apta ao cultivo em todas as culturas. As florestas, por sua vez, poderão ser afetadas por alterações nas taxas de crescimento, de regeneração (devido ao aumento da temperatura, redução da umidade e aumento dos incêndios) e pelas alterações fisiológicas nos insetos polinizadores e surgimento de novas pragas (Oliveira & Alves, 2011).

De acordo com Teferi, Uhlenbrook, & Belket (2015), as mudanças na vegetação ocorrem de três formas: mudança sazonal ou cíclica, direcionada pelo clima (temperatura e chuva) impactando a fenologia da planta; mudança gradual ao longo do tempo (monotônica), como alterações no manejo do solo ou a sua degradação; e mudanças abruptas a partir de um determinado ponto no tempo, que podem ser causadas por distúrbios tais como transformações repentinas em políticas de uso da terra, desmatamento, inundações, secas e incêndios.

A análise de séries temporais de índices de vegetação pode relevar tendências de alterações sazonais e interanuais relacionadas às mudanças ambientais em diferentes escalas. Nesse sentido, o SIG Idrisi (Eastman, 2009b) desenvolveu a técnica chamada Análise de Tendência Sazonal (Seasonal Trends Analysis, STA), disponível na ferramenta Earth Trends Modeler (ETM), para analisar e modelar essas tendências. A técnica compreende duas etapas de análise de séries temporais e uma etapa final de processamento para visualização e análise dos resultados. Em todas elas, a análise é realizada pixel a pixel ao longo do tempo (Eastman et al., 2009).

Na primeira etapa, as imagens de cada ano da série temporal de interesse são submetidas à análise de regressão harmônica [2], a saber:

$$y = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{n=2} \left\{ a_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) + b_n \cos\left(\frac{2\pi nt}{T}\right) \right\} + e \quad (2)$$

Em que:  $\alpha_0$  é a média da série; *n* é a harmônica (um número inteiro multiplicador); *t* é o tempo; *T* é a extensão temporal da série; e *e* é o termo relativo ao erro. O número de harmônicas pode variar de 1 a *T*/2 (metade da série temporal), mas Eastman (2009a) recomenda o uso de não mais que duas harmônicas, pois ela fornece uma generalização importante da curva sazonal e quanto maior sua frequência, mais ela será afetada por ruídos sub-anuais.

Rearranjando os termos da equação após resolução e ignorando o fator de erro, a curva sazonal generalizada pode ser expressa como [3]:

$$y = \alpha_0 + \sum_{n=1}^{n=2} \alpha_n \sin\left(\frac{2\pi nt}{T} + \varphi_n\right) \quad (3)$$

Onde:  $\alpha_n$  são amplitudes e  $\varphi_n$  são ângulos de fase variando de 0° a 360°. A sazonalidade de todos os pixels é expressa na forma de cinco imagens de parâmetros de forma harmônica para cada ano: a imagem média anual (Amplitude 0), as imagens amplitude e fase para o ciclo anual (Amplitude 1 e Fase 1) e as imagens amplitude e fase para o ciclo semi-anual da série temporal (Amplitude 2 e Fase 2).

Tendo calculado os cinco parâmetros de forma supracitados, a segunda etapa da análise de tendência sazonal consiste na verificação da existência de tendência nestes parâmetros usando o operador de declividade mediana Theil-Sen, que calcula a declividade (inclinação ou slope) de cada combinação pareada de amostras ao longo da extensão temporal da série para cada pixel individualmente [4]. A mediana dessas inclinações é utilizada para caracterizar a tendência, resultando em um mapa de tendência para cada parâmetro de forma (Eastman et al., 2009).

$$TS \text{ slope} = \text{mediana} \left( \frac{X_j - X_i}{t_j - t_i} \right) \quad (4)$$

Onde: X representa o valor das amostras e t é a posição no tempo de cada amostra, em que  $1 \leq j \leq n$ , sendo n o tamanho da amostra (Eastman, 2009a).

A declividade mediana é um parâmetro estatístico robusto resistente ao impacto de dados discrepantes. É, portanto, muito efetiva na caracterização de tendências de pequenas séries temporais, por adotar um limiar de 29 % do tamanho da série temporal, ou seja, para que um valor discrepante (outlier) possa ser incluído no cálculo da tendência, ele deve ocorrer em pelo menos 29 % da extensão da série temporal (Teferi, Uhlenbrook, & Belket, 2015). No presente trabalho, a série temporal contém 368 imagens EVI (23 imagens por ano e 16 anos), o que significa que um valor deve estar presente em pelo menos 107 imagens ou 4,64 anos, excluindo, portanto, os efeitos dos fenômenos ENOS (El Niño - Oscilação Sul) e La Niña, cuja duração é de 12 meses e de 12 a 24 meses, respectivamente.

A ferramenta STA também calcula o parâmetro interceptação mediana [5] de cada parâmetro de forma para poder gerar representações das curvas sazonais. Isto é feito projetando a inclinação mediana através dos valores dos dados de um pixel em cada intervalo de tempo e calculando a mediana dos interceptos assim determinados (Eastman et al., 2009).

$$\text{Intercepto} = X_i - \text{Inclinação mediana} * t_i \quad (5)$$

É impossível resumir os cinco parâmetros de forma de curvas sazonais em apenas uma imagem, mas eles podem ser reunidos em composições coloridas RGB. A ferramenta STA produz a composição colorida Amplitude, associando a imagem Amplitude 0 ao canal vermelho, a Amplitude 1 ao canal verde e a Amplitude 2 ao canal azul. O mesmo ocorre com a imagem Fase, que aloca a imagem Amplitude 0 no canal vermelho, a Fase 1 no canal verde e a Fase 2 no canal azul (Eastman et al., 2009).

Tais composições coloridas possuem número muito elevado de classes temáticas, o que torna difícil, ou quase impossível, sua interpretação. Para facilitá-la, foi desenvolvida uma ferramenta interativa de auxílio à interpretação, na qual uma área de interesse pode ser delineada por meio de um arquivo

vetorial ou por uma amostra circular. A declividade mediana e os valores de intercepto são calculados sobre todos os pixels da amostra e curvas ajustadas de cada parâmetro de forma são criadas para o início e o final da série temporal, conforme preferência do usuário. Tais curvas são idealizadas com base nas tendências determinadas para a série inteira e, sendo plotadas no mesmo gráfico, permitem a comparação e a análise da sazonalidade. Também, é possível plotar curvas sazonais da mediana observada de um número de anos do início e do final da série temporal. Este intervalo é definido pelo usuário, descreve um período de tempo menor e apresenta mais ruídos que as curvas ajustadas (Eastman et al., 2009).

A significância dos parâmetros Theil-Sen slope e intercept pode ser analisada por meio do teste de significância Mann-Kendall, um teste não-paramétrico por meio do qual se obtém imagens dos parâmetros Z e p. A estatística Z segue a distribuição normal padrão com média zero e variância unitária sob a hipótese nula de ausência de tendência. Um valor positivo de Z indica tendência ascendente, ao passo que valores negativos de Z indicam tendência descendente. O parâmetro probabilidade (p) representa as medidas de evidência para rejeitar a hipótese nula (distribuição normal). Valores p inferiores ao intervalo de confiança são aceitos como tendência significativa, e valores superiores a este intervalo são rejeitados. Tais parâmetros são determinados pelas equações [6], [7] e [8].

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{para } S > 0 \\ 0 & \text{para } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{para } S < 0 \end{cases} \quad (6)$$

Em que: S é o coeficiente de correlação Mann-Kendall e Var(S) é a variância de S.

$$p = 2[1 - \phi(|Z|)] \quad (7)$$

Onde:

$$\phi(|Z|) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{|Z|} e^{-t^2} dt \quad (8)$$

Vários pesquisadores utilizaram a Análise de Tendência Sazonal em diversos estudos de tendências sazonais e interanuais. Eastman et al. (2013) analisaram as tendências sazonais globais do índice NDVI no período de 1982-2011 e verificaram tendências de aumento dos valores médios anuais, da amplitude anual do índice de vegetação e do pico de verde no verão em diferentes áreas, prováveis reflexos das mudanças climáticas globais. Teferi, Uhlenbrook, & Belket (2015) estudaram as tendências interanuais e sazonais de NDVI na bacia do Alto Nilo Azul (bacia Abay), localizada na Etiópia, por meio das séries temporais de 1981-2006 (dados do Global Inventory Modeling and Mapping Studies - GIMMS) e 2001-2011 (MODIS) e verificaram aumento na tendência positiva de NDVI no primeiro período, mas tendência de redução do índice em parte dela a partir de meados da década de 2000. Os autores também identificaram cinco classes de tendências nos parâmetros combinados de NDVI médio anual, amplitude anual do NDVI e ângulo de fase (posição temporal do pico de verde da vegetação). Mishra & Chaudhuri (2015) avaliaram as ten-

dências sazonais e interanuais de imagens NDVI (MODIS) na região de Uttarakhand, nos Himalaias indianos, entre os anos 2000 e 2014, e verificaram tendências negativas nas altitudes inferiores a 800 metros e superiores a 1.600 metros, mas tendências positivas nas altitudes entre 800 e 1.600 metros. Culturas irrigadas e áreas de expansão urbana nos contrafortes dos Himalaias apresentaram tendência à redução do índice de verde, enquanto culturas de sequeiro apresentaram tendência ao aumento do verde. A maioria da região apresentou também tendência à antecipação do início da estação verde.

No Brasil, no entanto, há poucos estudos de tendências sazonais e interanuais utilizando a técnica Seasonal Trends Analysis. A área de estudo deste trabalho abrange parcialmente vinte municípios do estado de São Paulo e sua principal atividade econômica é a agricultura, responsável por constantes mudanças no uso da terra e substituição da cobertura vegetal original. Ademais, apresenta diferentes tipos de solos e climáticos, o que torna sua vegetação propícia a diferentes comportamentos sazonais e interanuais. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi realizar a análise de tendência sazonal da série temporal de imagens EVI (Índice de Vegetação Realçado) do satélite MODIS na bacia do Rio Pardo, estado de São Paulo, Brasil, no período de 2001 a 2016, por meio da ferramenta Seasonal Trends Analysis (STA), com a finalidade de detectar tendências sazonais e interanuais no ciclo das culturas agrícolas e dos demais usos da terra ao longo do período analisado.

## II. MÉTODO

### A. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Pardo está localizada na região Centro-Sudoeste do Estado de São Paulo, Brasil, sendo parte da Região Hidrográfica do Paraná e componente da bacia hidrográfica do Rio Paranapanema. No sistema paulista de gerenciamento de recursos hídricos, faz parte da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 17 (UGRHI-17), que contém os tributários do médio curso do Rio Paranapanema. Os principais afluentes do Rio Pardo são o Rio Claro, em sua margem direita, e o Rio Novo, na margem esquerda (Piroli, 2013).

Sua área é de 4.801,47 km<sup>2</sup> e envolve parte ou a totalidade de vinte municípios, sendo os de maior área na bacia do Rio Pardo os municípios de Avaré, Botucatu, Santa Cruz do Rio Pardo, Águas de Santa Bárbara, Iaras e Itatinga (Figura 1). Os municípios mais populosos são: Botucatu (127.370 habitantes), Ourinhos (103.026 habitantes), Avaré (82.935 habitantes), Lençóis Paulista (61.454 habitantes) e Santa Cruz do Rio Pardo (43.929 habitantes), de acordo com o Censo Demográfico 2010 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2010). Dos vinte municípios integrantes, dezesseis possuem zona urbana total ou parcial dentro da área de estudo.

Geologicamente, a bacia do Rio Pardo é constituída por formações litoestratigráficas caracterizadas por rochas sedimentares e ígneas da Bacia do Paraná e por depósitos sedimentares recentes, de idade Cenozóica. Os arenitos do Grupo Bauru (Formações Adamantina e Marília) predominam nos interflúvios, e as rochas ígneas basálticas da Formação Serra Geral acompanham os leitos e várzeas dos rios principais, além de escarpas e cornijas na região das cuestas (Comitê da Bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema [CBH-MP], 2007).

Estando localizada na Bacia Sedimentar do Paraná, a bacia do Rio Pardo tem suas principais nascentes no Planalto Residual de Botucatu, no reverso da cuesta, onde predominam as coli-

nas com topos amplos, cujas altitudes variam entre 600 e 900 metros, com declividade média de 10 a 20 %. A região central e a foz do Rio Pardo estão localizadas no Planalto Centro-Ocidental, cujos relevos dominantes são as colinas amplas e baixas com altitude entre 300 e 600 metros e declividade entre 10 e 20 % (Ross & Moroz, 1997). As altitudes máxima e mínima são 1.003 metros e 376 metros, perfazendo a amplitude altimétrica de 627 metros. Aproximadamente 89 % da área da bacia possui declividade inferior a 12 %, o que caracteriza seu relevo plano, tendo favorecido a ocupação agrícola, a mecanização e o desmatamento de grande parte da vegetação original (Piroli, 2013).



Figura 1. Localização da bacia hidrográfica do Rio Pardo, Estado de São Paulo.

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, a maioria dos municípios localizados no centro, sul e leste da bacia do Rio Pardo é caracterizada pelo tipo climático Cwa, clima temperado úmido com inverno seco e verão quente. Os municípios de Salto Grande e Lençóis Paulista, a exemplo de grande parte dos municípios do noroeste paulista, apresentam clima do tipo Aw, tropical (megatérmico) com estação seca no inverno, e os municípios de Ourinhos e Canitar possuem clima Am, tropical monçônico com inverno seco e chuvas excessivas no verão (Miranda et al., 2005).

Nos municípios situados na porção oeste da área de estudo, o tipo de vegetação original predominante é a Floresta Estacional Semidecidual, subtipo Antrópica (Vegetação secundária e atividades agrárias). Já na porção leste destaca-se a vegetação de Cerrado, também antropizada (subtipo Atividades agrárias) (IBGE, 2004). O Inventário Florestal da Vegetação Nativa do Estado de São Paulo (São Paulo, 2009) evidencia a conservação de fragmentos florestais de cerrado na porção central da área de estudo e de fragmentos de menor tamanho de floresta estacional semidecidual nas porções oeste e leste. A maior parte da vegetação natural, no entanto, foi substituída pelas atividades agrícolas.

De acordo com Oliveira, Camargo, Rossi & Calderado Filho (1999), os principais tipos de solo da bacia hidrográfica do Rio Pardo são os Latossolos Vermelhos, que ocupam a maior área na bacia, os Latossolos Vermelho-Amarelos, os Nitossolos

Vermelhos e os Argissolos Vermelho-Amarelos. Dentre eles, os mais suscetíveis à erosão são os Latossolos Vermelho-Amarelos e os Argissolos Vermelho-Amarelos, sobretudo os localizados nas áreas de declividade mais elevada.

## B. MATERIAIS UTILIZADOS

Para a realização deste trabalho, utilizaram-se os seguintes materiais:

- Cartas topográficas do IBGE correspondentes à área de estudo, na escala 1:50.000 e equidistância entre as curvas de nível de 20 metros;
- Imagens do satélite Landsat-8, sensor Operational Land Imager (OLI), órbitas/pontos 220/76 (data de passagem: 30/07/2016) e 221/76 (data de passagem: 06/08/2016), bandas 3 (0,53 – 0,59  $\mu\text{m}$ ), 4 (0,64 – 0,67  $\mu\text{m}$ ), 5 (0,85 – 0,88  $\mu\text{m}$ ) e 6 (1,57 – 1,65  $\mu\text{m}$ ), de resolução espacial 30 metros e resolução radiométrica 16 bits, obtidas do Catálogo de Imagens do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) - <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>;
- Imagens EVI (Índice de Vegetação Realçado) do satélite MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), sensor Terra, produto MOD13Q1, do período de 01/01/2001 a 31/12/2016, com resolução espacial de 250 metros e resolução temporal de 16 dias, obtidas da ferramenta MODIS Reprojection Tool Web Interface (MRTWeb) - <https://mrtweb.cr.usgs.gov/>;
- Sistema de Informação Geográfica Idrisi Taiga (Eastman, 2009b), com destaque para a ferramenta Earth Trends Modeler (ETM);
- Sistema de Informação Geográfica ArcMap versão 10 (Environmental Systems Research Institute [ESRI], 2010).

## C. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A base de dados da bacia hidrográfica do Rio Pardo foi elaborada no SIG ArcMap versão 10, a partir do mosaico das cartas topográficas do IBGE que a compõem. A bacia hidrográfica foi delimitada considerando os pontos cotados que representam os divisores de águas e as curvas de nível.

As imagens EVI do satélite MODIS foram reprojetaadas da projeção sinusoidal para a projeção UTM e obtidas por meio da ferramenta MRTWeb. Como elas são fornecidas em resolução radiométrica de 16 bits, no intervalo de -2.000 a 10.000, realizou-se o reescalonamento para o intervalo -0,2 a 1,0 no SIG Idrisi Taiga utilizando o fator de escala 0,0001.

Em seguida, criou-se o projeto “rio\_pardo” e a série temporal de EVI no módulo “Explore” da ferramenta “Earth Trends Modeler”, definindo-se o intervalo de 16 dias, os dias Julianos correspondentes às imagens e as datas e horários de início (01/01/2001, à zero hora) e término (31/12/2016, às 23:59 horas) da série de dados.

Na sequência, gerou-se a visualização da série temporal na aba “Explore Space / Time Dynamics”, na qual se verificaram as mudanças temporais do índice EVI a partir do cubo de visualização dinâmica.

Na aba “Explore Temporal Profiles”, selecionou-se como amostra vetorial o limite da bacia do Rio Pardo para obter o gráfico de valores médios de EVI ao longo da série temporal de dezesseis anos e analisar, desta forma, as flutuações médias interanuais do índice de vegetação em cada ano da série, assim como a linha de tendência Theil-Sen.

A Análise de Tendência Sazonal foi realizada no módulo “Analysis”, aba “STA (Seasonal Trend Analysis)”. O limite da bacia hidrográfica do Rio Pardo foi utilizado como máscara para a análise. Definiu-se o período de cinco anos como intervalo de tempo para a análise das curvas sazonais observadas do início e do fim da série temporal, ou seja, 2001 a 2005 e 2012 a 2016. O número de harmônicas utilizado foi 2, conforme recomendado por Eastman et al. (2009), e optou-se por calcular a significância Mann-Kendall do parâmetro Theil-Sen. As etapas da Análise de Tendência Sazonal estão descritas na introdução deste artigo.

Para interpretar os resultados da Análise de Tendência Sazonal, utilizou-se o painel “Explore Trends” da aba “Explore”. Como as composições coloridas dos parâmetros de forma Amplitudes e Fases são difíceis de interpretar por análise visual e levando em consideração o objetivo da análise, de compreender as tendências sazonais e interanuais dos diferentes tipos de uso da terra, elaborou-se o mapa de uso da terra da bacia do Rio Pardo do período de julho/agosto de 2016. As classes de uso da terra foram individualizadas e convertidas ao formato vetorial para uso como amostra vetorial na análise dos parâmetros de forma.

Para a elaboração do mapa de uso da terra da bacia do Rio Pardo, foram utilizadas as bandas 3, 4, 5 e 6 do satélite Landsat, correspondentes às faixas do verde, vermelho, infravermelho próximo e infravermelho médio. Inicialmente, elaborou-se o mosaico entre as imagens correspondentes às órbitas/pontos 220/76 e 221/76 que compõem a área de estudo. Em seguida, foi elaborada a composição colorida falsa-cor RGB 654, na qual as bandas utilizadas e sua combinação possibilitam a adequada identificação dos alvos por análise visual. No SIG Idrisi Taiga, a classificação de imagens por segmentação é realizada em três etapas: segmentação, geração das assinaturas espectrais dos segmentos e classificação da imagem. A primeira etapa (módulo “Segmentation”) agrupa pixels adjacentes em segmentos de imagem de acordo com a similaridade espectral entre eles, empregando a abordagem de delineamento de bacias hidrográficas para criar os segmentos segundo sua variância. Uma imagem variância derivada é tratada como imagem superfície alocando pixels a segmentos específicos baseado na similaridade de variância. Todas as bandas foram utilizadas no cálculo da segmentação, com pesos iguais. Os demais parâmetros foram: largura da janela móvel 3 x 3, tolerância de similaridade 5 (quanto maior for este índice, maiores serão o tamanho dos segmentos gerados e o grau de generalização da classificação), e pesos iguais para os fatores média e variância.

Na segunda etapa (módulo “Segtrain”), o arquivo vetorial de segmentos é sobreposto à imagem de satélite por meio da qual é possível identificar as classes de uso da terra, e o usuário define as amostras de treinamento para cada classe, criando assim suas assinaturas espectrais. Cada classe amostrada deve ter no mínimo 40 pixels de treinamento. Neste trabalho, algumas classes de uso da terra que possuem variações espectrais foram separadas em classes diferentes conforme a assinatura espectral e reclassificadas para agrupamento após o término da classificação. A classe culturas anuais, por exemplo, foi separada em seis classes de comportamentos espectrais distintos, incluindo as diferentes culturas agrícolas, diferentes densidades de cobertura vegetal e as áreas de solo exposto, uma vez que as imagens de satélite utilizadas são do período de inverno, quando o solo agrícola está em repouso ou após a colheita dos cultivos de inverno, ou ainda após a colheita da cana-de-açúcar, realizado ao longo do ano.

A etapa final da segmentação de imagens consiste na classificação por segmentação (módulo “Segclass”). O “Segclass” é um classificador de regra majoritária que utiliza uma imagem classificada do tipo pixel a pixel e um arquivo vetorial de segmentos, atribuindo a cada segmento a classe majoritária presente na classificação pixel a pixel, melhorando sua acurácia, produzindo uma classificação mais suave e preservando os limites entre os segmentos (Eastman, 2009a). Nesse sentido, foi realizada uma classificação supervisionada por máxima verossimilhança (módulo “Maxlike”) a partir das assinaturas espectrais geradas na etapa de treinamento da segmentação, e a imagem resultante foi utilizada na etapa final para produzir a classificação por segmentação. Como as áreas urbanas possuem resposta espectral heterogênea, próxima à de um solo exposto, realizou-se sua vetorização manual em tela e a rasterização sobre o mapa de uso da terra resultante da segmentação de imagem.

Para que o comportamento sazonal dos diferentes usos da terra pudesse ser analisado, as classes do mapa foram convertidas ao formato vetorial para entrada no painel de análise como amostra vetorial. A união de todos os polígonos de uma mesma classe em um mesmo indicador foi realizada no SIG ArcMap 10, de modo a se considerar toda a área ocupada por ela nos parâmetros de forma.

O painel “Explore trends” é uma ferramenta de auxílio à visualização e interpretação dos resultados da Análise de Tendência Sazonal, possuindo ferramentas para análise das tendências sazonais e das tendências interanuais. O módulo de tendências sazonais produz gráficos e informações sobre os parâmetros de forma das áreas selecionadas sobre as composições coloridas de Amplitude e Fase a partir de amostras circulares ou amostras vetoriais. Os parâmetros analisados neste trabalho, para cada classe de uso da terra, foram:

- Amplitude 0: média anual e linha de tendência Theil-Sen do índice de vegetação EVI ao longo da série temporal;
- Amplitude 1: diferença entre os valores máximo e mínimo de EVI ao longo do ano e linha de tendência Theil-Sen ao longo da série temporal;
- Fase 1: denota a temporização do pico de verdor anual expresso pelos valores EVI, representado pela posição do ponto de início da onda senoidal do verdor anual. Os valores da imagem Fase 1 variam entre 0 e 359°. Um aumento ou redução no ângulo de fase significa uma mudança no tempo de pico de verde para um período anterior ou posterior do ano, respectivamente. Cada 30° de fase indica a antecipação ou atraso de um mês no calendário anual. A redução no valor da Fase 1 representa um atraso no pico de verde ou no período de aumento de verde ao longo do ano, e o aumento deste valor significa a antecipação deste pico (Eastman et al., 2009; Teferi, Uhlenbrook, & Belket, 2015);
- Curvas sazonais ajustadas: linhas ajustadas baseadas na tendência de valores EVI nos meses do ano no primeiro ano da série temporal (linha verde) e no último ano da série (linha vermelha), determinadas ao longo de toda a série temporal. A análise das duas curvas possibilita a fácil interpretação das tendências de mudança sazonal da amostra analisada (Eastman et al., 2009a);
- Curvas sazonais observadas: representam os valores medianos observados da curva sazonal de um número determinado de anos do início e do final da série temporal (neste trabalho, cinco anos). Tais curvas apresentam mais ruídos que as curvas sazonais ajustadas, mas são utilizadas como auxílio na interpretação das variações sazonais;

- Green up/down: permite analisar as tendências na fenologia da vegetação. O parâmetro green up representa o período de maior verdor da vegetação e o parâmetro green down, o tempo de máxima perda de verde (clorofila) das plantas ao longo do ciclo anual. A ferramenta STA determina a data e horário de uma porcentagem dos intervalos de aumento e de redução do conteúdo verde. O valor padrão, utilizado neste trabalho, é de 40 % de cada período, ou seja, a data no ciclo anual em que o aumento do verde excede 40 % da trajetória completa de mínimo para máximo verde, e o momento em que excede 40 % da trajetória de máximo para mínimo teor de verde. Tal parâmetro possibilita analisar e comparar a duração do “período verde” no início e no final da série temporal. Neste trabalho, analisou-se a duração do período verde de todas as classes de uso da terra.

Os parâmetros de forma Amplitude 2 e Fase 2, que representam a amplitude do ciclo semianual e o tempo de início da curva senoidal do ciclo semianual, respectivamente, não foram analisados neste trabalho pois são de difícil interpretação (Eastman et al., 2009).

A análise de tendência interanual do painel “Explore trends” exhibe os mapas de inclinação mediana Theil-Sen (TS Slope) e os mapas dos parâmetros de significância p e Z, resultantes do teste não-paramétrico de significância Mann-Kendall.

O mapa do parâmetro de significância p apresenta escala de valores entre 0 e 1. Testaram-se neste mapa os níveis de significância de 99,9 %, 99 % e 95 %, ou seja, reclassificou-se o mapa de p em mapas booleanos, nos quais os valores  $p < 0,001$ ,  $p < 0,01$  e  $p < 0,05$ , considerados de tendência significativa (positiva ou negativa), tiveram valor 1 atribuído, e os valores p superiores a estes limites foram reclassificados em valor 0. Como a área com tendência significativa a 99,9 % de significância foi de 1.382,12 km<sup>2</sup>, representando 28,8 % da área total da bacia do Rio Pardo, e os níveis 99 % e 95 % adicionaram 415,04 e 914,07 km<sup>2</sup> às áreas de tendência significativa, respectivamente, optou-se por adotar a significância de 99,9 % neste trabalho para as análises posteriores, considerado nível elevado de significância e cuja área representativa pode ser considerada prioritária para estudo e intervenção.

Em seguida, as áreas de significância positiva e negativa a  $p < 0,001$  foram sobrepostas ao mapa do parâmetro Z de significância Mann-Kendall para verificar a força da significância e a sua distribuição espacial, assim como ao mapa TS Slope da Fase 1, de forma a avaliar as áreas de antecipação ou retardamento temporal do pico de verde anual e sua distribuição espacial. Também, foram comparadas as curvas sazonais observadas de EVI de dois municípios da bacia do Rio Pardo que apresentaram diferentes usos da terra predominantes, para verificar seu comportamento e evidenciar a importância da ferramenta STA como subsídio à gestão agrícola e ambiental municipal.

### III. RESULTADOS

A variabilidade do índice de vegetação EVI na bacia hidrográfica do Rio Pardo ao longo da série temporal 2001-2016 decorre de inúmeros fatores, tais como o uso da terra e suas alterações sazonais e interanuais, o regime pluviométrico, a ocorrência de secas e geadas, os fenômenos El Niño - Oscilação Sul e La Niña, o balanço hídrico do solo, a temperatura do ar, entre outros.

A Figura 2 apresenta os valores médios mensais de EVI na bacia do Rio Pardo no período 2001-2016 e a linha de tendência obtida pelo operador Theil-Sen.



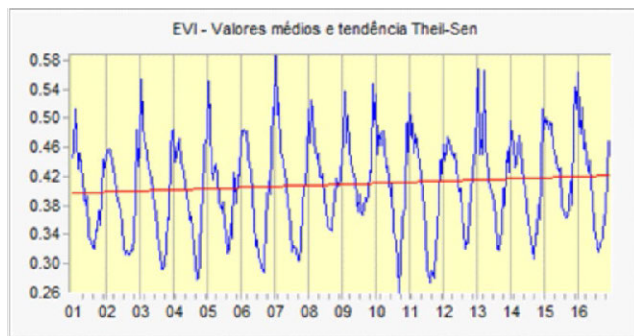


Figura 2. Valores médios mensais de EVI na bacia do Rio Pardo, SP, Brasil, no período 2001-2016 e linha de tendência Theil-Sen.

Os maiores valores máximos de EVI ocorreram no verão 2007-2008, seguido dos verões 2012-2013 e 2015-2016, correspondentes ao período chuvoso na região Sudeste do Brasil. Neste mesmo período (dezembro a fevereiro, aproximadamente), os menores valores de EVI ocorreram nos períodos 2001-2002 e 2012-2013. O período 2015-2016 foi caracterizado pela atuação do fenômeno ENOS de intensidade muito forte, e o período 2006-2007, pela ocorrência do mesmo fenômeno, mas com intensidade fraca. Embora não haja alteração comprovada no regime de chuvas na região Sudeste provocada pelo El Niño, a exemplo do que ocorre na região Sul (aumento do regime de chuvas, principalmente na primavera), pode ocorrer aumento nas temperaturas médias (Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos [CPTEC], 2016), o que favorece a evapotranspiração e a ocorrência de chuvas convectivas no período, aumentando a disponibilidade hídrica para as plantas.

No período seco, os menores valores médios de EVI foram observados no inverno/primavera de 2011, seguido do ano 2012 e do ano 2004. No ano 2011 ocorreram duas geadas no centro-oeste do estado de São Paulo nos meses de junho e julho (Demarchi & Piroli, 2015), que provocaram perdas de safras ou redução do rendimento agrícola e, principalmente, a redução da atividade fotossintética das plantas. Já os maiores valores médios de EVI no período seco ocorreram nos anos 2009, 2015 e 2008, respectivamente, os quais foram influenciados pelos índices pluviométricos e, possivelmente, pela produtividade agrícola das culturas de inverno, que elevaram os valores de EVI. Em dois anos (2009 e 2015), houve atuação do fenômeno El Niño, sobretudo a partir do período chuvoso, e em 2008, atuação do fenômeno La Niña de intensidade forte, o que implica a necessidade de estudos aprofundados sobre a influência destes fenômenos climáticos de macroescala no regime pluviométrico e na vegetação da área de estudo. Os meses de menores valores médios de EVI na série temporal ocorreram entre agosto e outubro, com predomínio do mês de setembro.

A linha de tendência Theil-Sen evidencia uma tendência de aumento nos valores EVI durante a série temporal em aproximadamente 0,01. Como a Análise de Tendência Sazonal empregada neste estudo desconsidera as pequenas oscilações e ruídos até que estejam presentes em pelo menos 29 % da extensão da série temporal, os eventos climáticos destacados anteriormente têm influência reduzida ou nula na caracterização das tendências e os valores médios de EVI podem esconder variações espaciais, pois enquanto algumas áreas podem ter tendência de aumento da cobertura e atividade vegetal, outras podem ter tendência de redução das mesmas, até mesmo como consequência das mudanças no uso da terra.

A Figura 3 apresenta o mapa de uso da terra da bacia hidrográfica do Rio Pardo de julho/agosto de 2016.

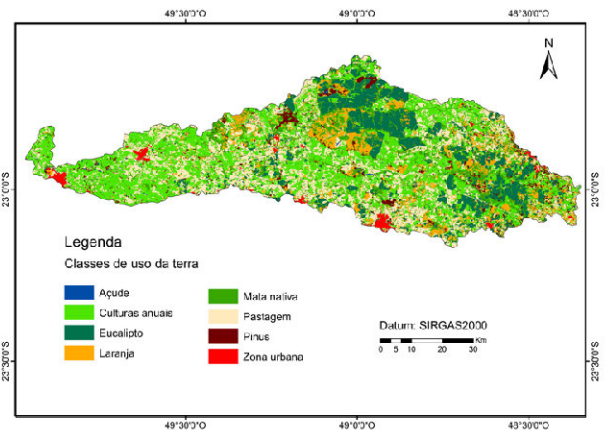


Figura 3. Mapa de uso da terra da bacia hidrográfica do Rio Pardo, de julho/agosto de 2016.

As áreas ocupadas pelas classes de uso da terra, em km<sup>2</sup> e porcentagem da área total, são apresentadas na Tabela 1.

**TABELA I**  
ÁREA DAS CLASSES DE USO DA TERRA DA BACIA DO RIO PARDO (JULHO/AGOSTO DE 2016)

USO DA TERRA	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	ÁREA (%)
Mata nativa	633,41	13,19
Laranja	501,93	10,45
Açude	22,34	0,47
Eucalipto	673,31	14,02
Pinus	176,95	3,69
Culturas anuais	1.600,77	33,34
Pastagem	1.124,11	23,41
Zona urbana	68,66	1,43
Total	4.801,47	100

As culturas anuais, que representam mais de 33 % da área de estudo, compreendem os cultivos de milho, soja, cultivos de inverno (plantas de cobertura, por exemplo), cana-de-açúcar (apesar do ciclo do cultivo ser de cinco anos, o solo fica descoberto durante o período do ano compreendido entre o corte e o desenvolvimento vegetativo após a rebrota, ou coberto pela palhada do período anterior) e solo exposto, os quais estão cobertos por algum cultivo em parte do ano, sobretudo no verão. Elas se distribuem por todos os municípios da bacia, mas apresentam maior concentração nos municípios de Santa Cruz do Rio Pardo, Ourinhos, Canitar, Chavantes e Ipaçu, Cerqueira César, Avaré e Iaras, com destaque para a cana-de-açúcar, que abastece algumas usinas de açúcar e álcool situadas nestes municípios.

As pastagens também se distribuem por toda a bacia hidrográfica ocupando aproximadamente 23 % de sua área. Destacam-se as pastagens extensivas, com nível médio de manejo e adoção de práticas de conservação do solo (terraços) em grande parte das áreas cuja declividade do terreno exige tal prática.

A citricultura representa mais de 10 % da área da bacia do Rio Pardo, mas está concentrada em alguns municípios nas proximidades de algumas indústrias de suco, como Santa Cruz do Rio Pardo, Águas de Santa Bárbara, Iaras, Avaré e Botucatu. O cultivo de laranja proporciona alta densidade de cobertura vegetal ao solo, pois as entrelinhas são em geral vegetadas.

O cultivo de eucalipto se concentra nos municípios de Iaras, Borebi, Lençóis Paulista, Botucatu, Itatinga e Avaré, nas porções norte e leste da bacia do Rio Pardo. Tais lavouras abastecem as indústrias de papel, celulose, madeira, de geração de energia, entre outras localizadas nos respectivos municípios. Há também, no município de Itatinga, a Fazenda

Experimental pertencente à Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” da Universidade de São Paulo (ESALQ/USP), que também desenvolve pesquisas na área de produção florestal e conservação do solo e da água. De acordo com Araújo Jr., Campos, Barros & Cardoso (2002), o cultivo de eucalipto substituiu áreas de cerrado, campos sujo e limpo no município de Botucatu devido aos incentivos fiscais, à instalação de companhias reflorestadoras na região, ao baixo valor das terras e à baixa fertilidade do solo, adequada para tal cultura. O cultivo de pinus ocupa área menor, mas segue os princípios da produção de eucalipto, estando localizado em áreas próximas a elas, além de ocupar também área significativa no município de Águas de Santa Bárbara.

As áreas de mata nativa estão esparsamente distribuídas sobre a bacia do Rio Pardo, nas proximidades dos cursos d'água (mata ciliar) e em fragmentos preservados. Sua área total (13,19 % da superfície da bacia), no entanto, está em desacordo com a legislação florestal brasileira (Brasil, 2012), que define em 20 % a área mínima de cada imóvel rural a ser preservada com vegetação nativa a título de Reserva Legal, além das Áreas de Preservação Permanente ao redor dos cursos d'água, nascentes, áreas de declividade superior a 45° e topos de morros com altura superior a 100 metros e declive superior a 25°. Dos 20 municípios que integram a bacia do Rio Pardo, 16 possuem toda a área urbana ou parte dela dentro da bacia, à exceção de Borebi, Lençóis Paulista, Salto Grande e São Manuel. Algumas delas, sobretudo as da porção sul, estão situadas nos divisores de água da bacia, ou seja, nos topos das colinas que caracterizam o Planalto Ocidental Paulista, pois surgiram ao redor da Estrada de Ferro Sorocabana.

As curvas de tendência sazonal ajustadas e observadas das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo resultantes da Análise de Tendência Sazonal são apresentadas na Figura 4 a seguir. Os gráficos de curvas ajustadas plotam as curvas sazonais de índice de vegetação EVI no primeiro e no último ano da série temporal (2001 e 2016), levando em consideração na análise sazonal toda a série temporal. O gráfico das curvas sazonais observadas, por sua vez, considera apenas os cinco primeiros e os cinco últimos anos da série e apresenta mais ruídos.

Os gráficos da Figura 4 evidenciam o aumento dos valores médios de EVI durante todo o ciclo anual nas classes de mata nativa, laranja, açude, eucalipto, pinus e pastagem. As diferenças entre os índices EVI no início e no final da série temporal são menores nas classes de mata nativa, açudes e pastagens, e maiores nas áreas cultivadas com eucalipto, sendo o aumento de aproximadamente 0,05. Este aumento pronunciado do vigor vegetativo das lavouras de eucalipto pode ter ocorrido em razão do plantio após o início da série temporal, em substituição a culturas anuais ou pastagens, por exemplo, do calendário de corte e desbaste, ou por alterações favoráveis nas características climáticas, que propiciaram maior desenvolvimento vegetativo e densidade de cobertura vegetal do solo. Os cultivos de laranja também apresentaram aumento significativo nos valores EVI, de aproximadamente 0,05 - 0,06, os quais também podem ser explicados pela expansão da área cultivada, pelo aumento do nível de manejo, pela vegetação das entrelinhas do cultivo, pelo crescimento das árvores, entre outros fatores. Enquanto os cultivos de laranja, os açudes, cultivos de pinus, culturas anuais, pastagens e zonas urbanas apresentam os menores índices EVI em setembro, as lavouras de eucalipto têm seus menores valores em outubro, e as matas nativas entre agosto e setembro. Tal comportamento, avaliado pelo parâmetro de forma “fase”, não apresenta variações visualmente significativas no decorrer da série temporal.

## Curvas sazonais ajustadas    Curvas sazonais observadas

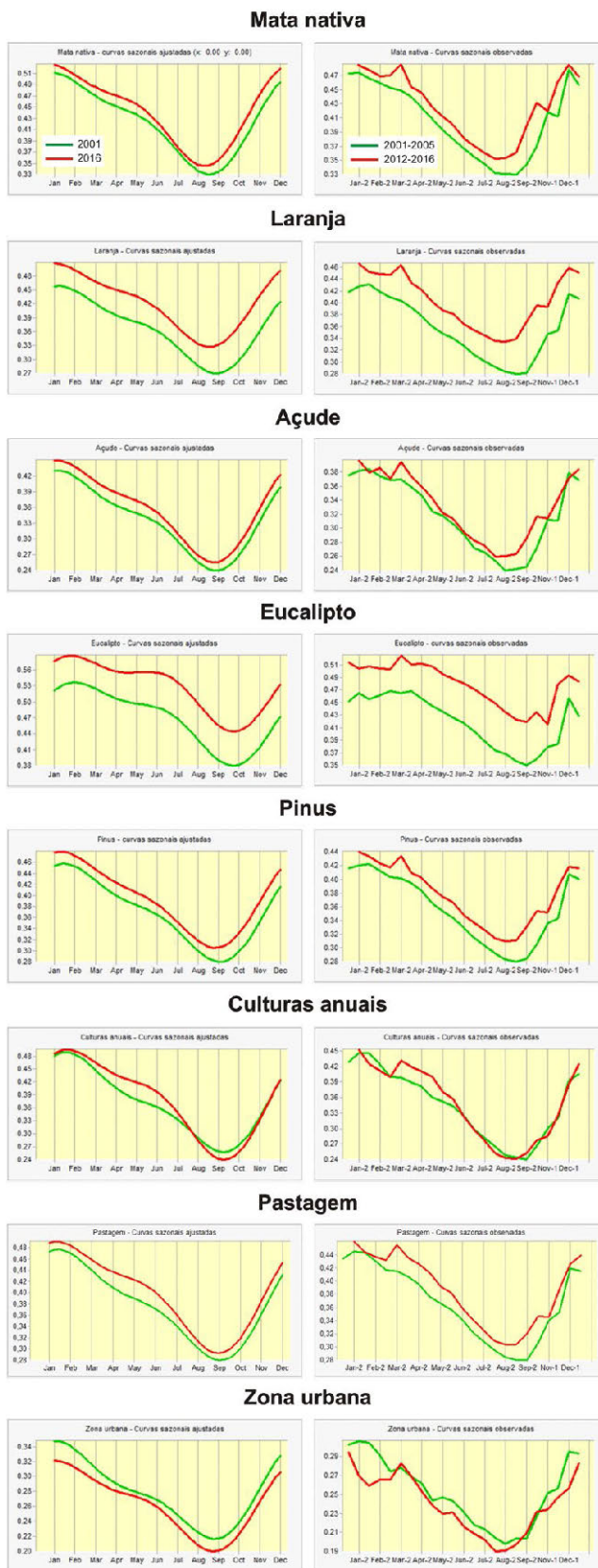


Figura 4. Curvas sazonais ajustadas (esquerda) e observadas (direita) das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

Em oposição à maioria das culturas agrícolas ou florestas nativas, as culturas anuais apresentaram nos últimos anos aumento dos valores EVI de janeiro a julho, mais pronunciado de abril a junho, mas redução em relação aos primeiros anos nos meses de setembro e outubro, além de tendência semelhante de novembro a janeiro, meses de desenvolvimento das culturas de verão. Esta característica necessita ser mais bem avaliada e interpretada, pois o tipo de cultura anual cultivado a cada ano e o seu rendimento variam em razão do seu preço de mercado, dos índices pluviométricos e temperaturas, do plantio ou não de culturas de inverno para produção e/ou cobertura e fertilização do solo, da implantação de culturas anuais durante a série temporal em substituição a áreas de pastagem ou silvcolas, e no caso da cana-de-açúcar, do calendário anual de corte estabelecido pelas usinas de açúcar e álcool. De qualquer maneira, nos meses de setembro e outubro ocorrem o preparo do solo e o plantio das culturas de verão, sendo a densidade de cobertura vegetal verde reduzida em relação aos meses anteriores mesmo em caso de manutenção dos restos culturais em sistema de plantio direto, o que pode explicar a redução nos valores de EVI. Já nos meses de março a maio, o aumento dos valores EVI pode estar associado à ampliação da área cultivada pelo milho safrinha, usualmente plantado após a colheita da soja ou milho em sistema de plantio direto, o que aumenta a densidade de cobertura vegetal e a disponibilidade de água no solo para o desenvolvimento da planta.

Em relação às zonas urbanas, a redução dos índices EVI ao longo de todo o ano de 2001 a 2016 está relacionada ao crescimento urbano, que ocupou áreas antes utilizadas para fins agrícolas.

As curvas sazonais observadas mostram que em todas as culturas houve aumento nos valores EVI no mês de março em relação ao mês de fevereiro, possivelmente em consequência dos elevados índices pluviométricos característicos dos meses anteriores. Observou-se, também, em todas as classes de uso da terra, exceto nas culturas anuais e zona urbana, uma pequena redução no índice no início do mês de novembro, em comparação com outubro, e elevação pronunciada no mês de dezembro. As curvas sazonais observadas se apresentaram, em geral, condizentes com as curvas sazonais ajustadas.

A Figura 5 apresenta os gráficos do parâmetro de forma Amplitude 0 em função do tempo (16 anos) de dados EVI da série temporal, assim como as linhas de tendência mediana Theil-Sen para cada classe de uso da terra da bacia do Rio Pardo.

O parâmetro Amplitude 0 representa valores médios anuais de EVI das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo. Com exceção da zona urbana, todos os demais usos da terra apresentaram tendência de aumento dos valores médios anuais de EVI no decorrer da série temporal. As tendências de aumento mais significativas ocorreram nas culturas de eucalipto e laranja, da ordem de 0,05. A linha de valores anuais de EVI aponta para um possível aumento da área cultivada com ambas as culturas a partir do ano 2005. A mesma tendência ocorre para as culturas de pinus e as áreas de pastagem. Observam-se também, em todos os usos da terra, dois picos de índice EVI, nos anos 2009 e 2015, anos de atuação moderada e forte do fenômeno El Niño, respectivamente, e provável aumento dos índices pluviométricos, assim como anos de baixo EVI, a exemplo dos anos 2002, 2004, 2011 e 2014, nos quais pode ter havido estresse hídrico em razão de índices pluviométricos menores e ocorrência de geadas, como no ano 2011.

A tendência de aumento global do índice EVI na bacia hidrográfica estudada pode estar relacionada a mudanças climáticas e ambientais, com reflexo positivo (aumento) nas temperaturas, regime de chuvas e umidade do solo.

Os gráficos dos parâmetros Amplitude 1 (amplitude do ciclo anual) da bacia do Rio Pardo são apresentados na Figura 6 a seguir.

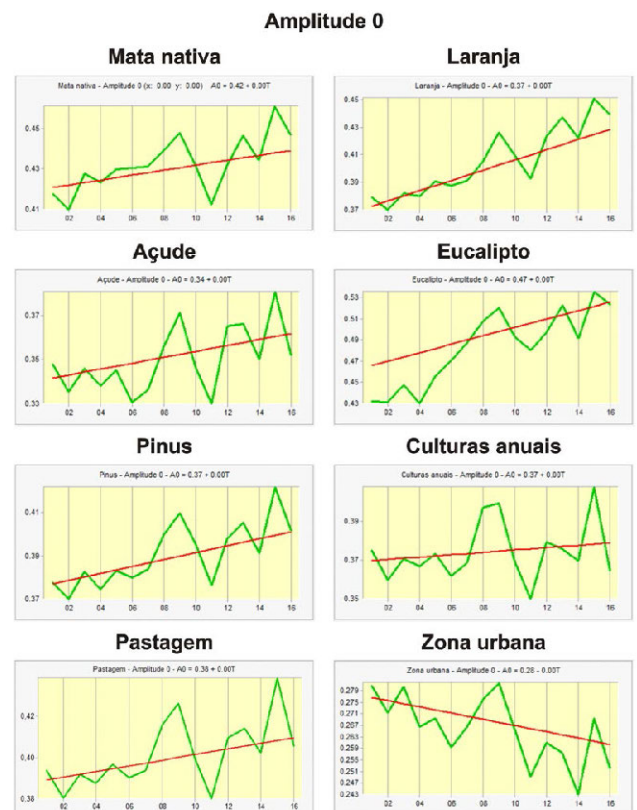


Figura 5. Amplitude 0 e linha de tendência mediana das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

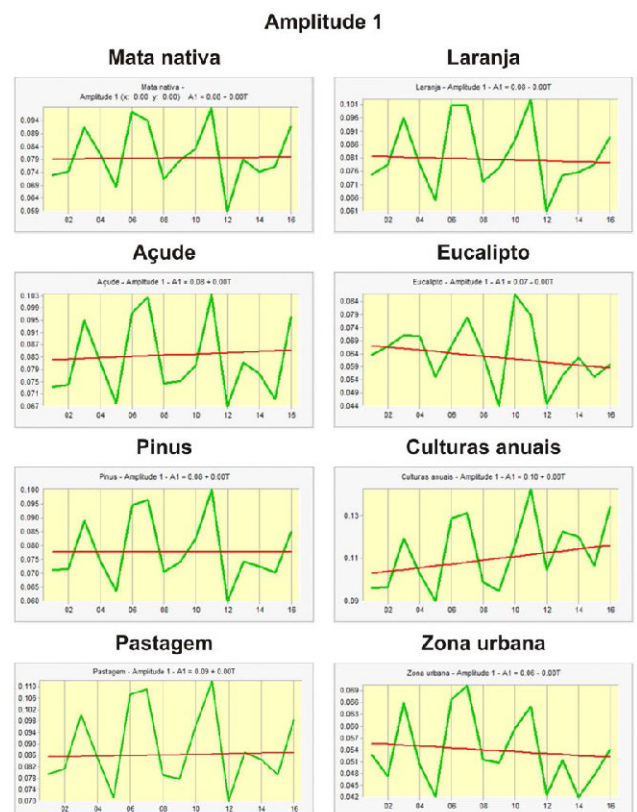


Figura 6. Amplitude 1 e linha de tendência mediana das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

As linhas de tendência mediana indicam tendência nula de EVI no ciclo anual do cultivo de pinus; tendência positiva, porém próxima a zero, para a amplitude de valores EVI de mata nativa, açude e pastagem; tendência negativa, mas com valores próximos à nulidade, para os cultivos de laranja e eucalipto; e tendência positiva para as culturas anuais, com aumento de aproximadamente 0,01 na amplitude anual de EVI. Esta característica era esperada para as culturas anuais, uma vez que a atividade fotossintética reduz e/ou deixa de existir em determinados períodos do ano em datas variáveis a cada ano. Ademais, os cultivos de verão (milho e soja, principalmente), mas também a cana-de-açúcar, são vulneráveis a extremos climáticos tais como geadas, escassez ou excesso de chuvas e umidade do solo. No caso das zonas urbanas, que apresentaram tendência negativa de aproximadamente 0,02 na amplitude anual de EVI, o comportamento se deve à substituição de cultivos agrícolas por áreas urbanas e à consolidação destas, apresentando áreas verdes de tamanho reduzido.

Analisando individualmente os anos da série temporal, os períodos de maior amplitude de valores EVI foram 2011, 2007 e 2006, nos quais houve redução significativa do índice em função de limitações hídricas e climáticas. Nos anos 2005 e 2012, principalmente, houve variações menores de EVI, consequência provável de maior regularidade climática. Todos os usos da terra apresentaram quatro ciclos bem definidos de aumento e redução da amplitude do índice de verde no decorrer da série temporal, e um quinto ciclo que se iniciou no ano 2016.

Os gráficos do parâmetro de forma Fase 1, que indica a posição temporal do pico anual de verde da vegetação, e as linhas de tendência mediana Theil-Sen, são apresentados na Figura 7.

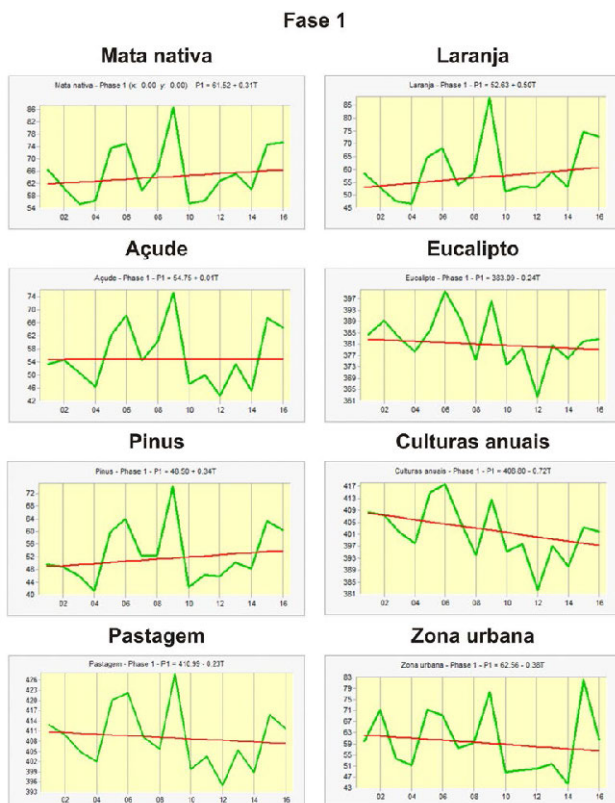


Figura 7. Fase 1 e linha de tendência mediana das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo (série temporal 2001-2016).

Os gráficos mostram a tendência de aumento no ângulo de fase durante a série temporal nas classes mata nativa, laranja

e pinus, evidenciando que o pico da onda senoidal de vigor vegetativo está iniciando antes no decorrer do ano. Porém, tal tendência é pequena, variando de 3 a 5 graus, aproximadamente, o que representa 3 a 5 dias de antecipação. As culturas agrícolas eucalipto, culturas anuais, pastagem e as zonas urbanas tiveram tendência de redução do ângulo de fase, o que significa atraso no pico de vigor vegetativo. A diferença mais pronunciada foi detectada nas culturas anuais, de aproximadamente 9°, ou 9 dias, o que pode ter tido influência de inúmeros fatores, como o atraso no plantio devido a condições climáticas adversas, a variedade de culturas plantadas ao longo dos dezesseis anos que possuem diferentes datas de plantio, o número de cultivos por ano, o uso da terra ao longo da série temporal, (pode ter havido substituição das culturas anuais por pastagem ou outro cultivo), o calendário de corte da cana-de-açúcar, entre outros. Os anos 2006, 2009 e 2015 apresentaram valores medianos elevados de Fase 1, com variações entre os diferentes usos da terra, indicando a antecipação do plantio ou de máximo desenvolvimento vegetativo das plantas em decorrência da disponibilidade hídrica.

A Tabela II apresenta as datas e horários estimados de início e término dos períodos “40 % Green-up” e “40 % Green-down” das classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo, assim como as diferenças de duração do chamado “período verde” entre os anos 2001 e 2016.

TABELA II

DATAS E HORÁRIOS DE INÍCIO E TÉRMINO DOS PERÍODOS “GREEN-UP” E “GREEN-DOWN” E DURAÇÃO DO “PERÍODO VERDE” (2001-2016)

USO DA TERRA	ESTÁGIO FENOLÓGICO (40 % GREEN-UP/DOWN)	2001	2016	DIF*	DIF PV**
Mata nativa	Green-up	14/Out - 8:00	29/Set - 9:00	-14 dias	+21.98 dias
	Green-down	09/Jun - 1:00	16/Jun - 0:00	+7.98 dias	
Laranja	Green-up	25/Out - 3:00	14/Set - 15:00	-39.5 dias	+73.2 dias
	Green-down	17/Jun - 24:00	20/Jul - 16:00	+33.7 dias	
Açude	Green-up	24/Out - 11:00	13/Out - 21:00	-9.59 dias	+22.39 dias
	Green-down	16/Jun - 14:00	28/Jun - 9:00	+12.8 dias	
Eucalipto	Green-up	09/Dez - 9:00	12/Nov - 23:00	-27.4 dias	+33.6 dias
	Green-down	10/Ago - 19:00	15/Ago - 24:00	+6.2 dias	
Pinus	Green-up	31/Out - 10:00	12/Out - 20:00	-17.6 dias	+32.1 dias
	Green-down	19/Jun - 5:00	02/Jul - 17:00	+14.5 dias	
Culturas anuais	Green-up	05/Nov - 11:00	06/Nov - 18:00	+2.29 dias	+13.71 dias
	Green-down	16/Jun - 9:00	01/Jul - 7:00	+16 dias	
Pastagem	Green-up	30/Out - 19:00	20/Out - 23:00	-8.86 dias	+26.46 dias
	Green-down	16/Jun - 16:00	03/Jul - 6:00	+17.6 dias	
Zona urbana	Green-up	23/Out - 0:00	02/Nov - 17:00	+11.7 dias	-29.8 dias
	Green-down	01/Jun - 9:00	13/Mai - 7:00	-18.1 dias	

\*Dif: Diferença de início do período 40 % Green-up e 40 % Green-down entre o ano final (2016) e o ano inicial (2001) da série temporal.

\*\*Dif PV: Diferença de duração do período verde entre o ano final (2016) e o ano inicial (2001) da série temporal.

A comparação entre as datas de 40 % do período de verdejamento e de 40 % do período de redução do teor de clorofila e do vigor vegetativo da cobertura vegetal da bacia do Rio Pardo no início e no final da série temporal evidenciou que todas as culturas e florestas, com exceção das culturas anuais e da zona urbana, tiveram a data de 40 % de green-up antecipado e a data de 40 % de green-down atrasado. Destaca-se, entre os usos da terra, o cultivo de laranja, que teve aumento superior a 73 dias no período verde, possivelmente em decorrência do estabelecimento de parte das áreas cultivadas e/ou crescimento das árvores plantadas durante a série temporal. Também merecem destaque os cultivos de eucalipto e pinus, que tiveram aumento superior a um mês no período verde, devendo ser levado em

consideração seus calendários de plantio e exploração, bem como seu crescimento e aumento da cobertura do solo e fechamento do dossel no período analisado. Entre ambos os cultivos, há diferença de aproximadamente um mês entre o início do período green-up e green-down, sendo que o pinus ganha e perde biomassa verde antes do eucalipto. No caso da mata nativa, a tendência é de redução do período de perda de parte das folhas, que caracteriza a Floresta Estacional Semidecidual presente em parte da bacia do Rio Pardo. As pastagens também tiveram aumento no período verde em função da melhoria do manejo e das práticas de conservação do solo.

O período verde das culturas anuais tem a tendência de iniciar com atraso de dois dias (considerando que 2016 foi ano bissexto), no início de novembro, quando a parte vegetativa das culturas de verão começa a se desenvolver, mas o período da perda de clorofila tende a atrasar de junho ao início de julho. Para o estudo da tendência sazonal das culturas anuais, recomenda-se utilizar quatro harmônicas na análise de regressão, pois tais culturas apresentam dois períodos anuais de máxima e mínima produção de biomassa (duas safras anuais), sendo que no intervalo entre a colheita dos cultivos de verão e o estabelecimento das safras de inverno a redução da cobertura do solo e a perda de clorofila das plantas são menores.

Os parâmetros de forma e os períodos green-up/down analisados neste trabalho em função do uso da terra de julho/agosto de 2016 levaram em consideração, em sua determinação, valores medianos de EVI de toda área ocupada por cada classe de uso, que em alguns casos é superior a mil quilômetros quadrados, distribuindo-se sobre a bacia hidrográfica em diferentes tipos de solo, tipos climáticos e formas de manejo. Tais parâmetros podem variar para a mesma cultura agrícola, a exemplo do eucalipto (Figura 8), no qual as curvas sazonais ajustadas de uma área de plantio situada na porção leste da bacia são similares às apresentadas pela cultura na Figura 4, enquanto outra área de cultivo de eucalipto situada em sua porção norte apresenta curvas sazonais ajustadas em 2001 e 2016 bastante diferentes dos valores medianos da classe de uso da terra eucalipto, inclusive com tendência de redução dos valores EVI no período de fevereiro a novembro.

A significância dos parâmetros de forma mediana da análise de tendência sazonal e operador Theil-Sen slope foi avaliada pelos parâmetros de significância p e Z.

A Figura 9 apresenta as áreas de tendência significativa positiva e negativa nos níveis de significância de 95 %, 99 % e 99,9 %. O nível de significância de 95 % também inclui as áreas com tendência a 99 % e 99,9 % de significância, e o nível de significância de 99 % inclui as áreas com tendência a 99,9 % de significância.

A Tabela III apresenta as áreas com tendência significativa positiva e negativa para cada nível de significância na bacia do Rio Pardo.

A Figura 9 e a Tabela III evidenciam que quanto menor o nível de significância e, conseqüentemente, a confiabilidade dos dados, maior será a área com tendência significativa de aumento ou redução no índice de verde da vegetação. Como a área com tendência significativa a 99,9 % de significância é de 1.383,12 km<sup>2</sup>, correspondente a 28,8 % da área total, considerou-se que este nível de significância garante mais confiabilidade à tendência, devendo a área representada por tal probabilidade ser tomada como prioritária para estudos posteriores, sobretudo quanto aos impactos das mudanças climáticas na atividade fotossintética e fenologia da vegetação.

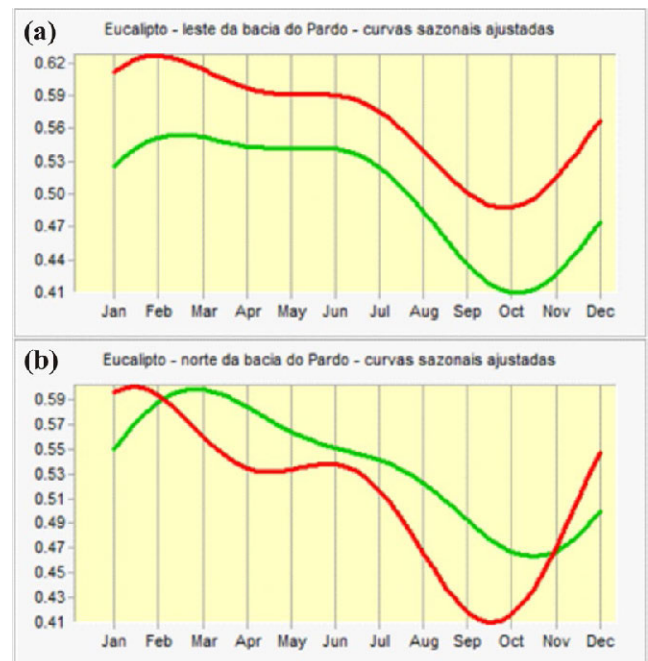


Figura 8. Curvas sazonais ajustadas de áreas de plantio de eucalipto (série temporal: 2001-2016): a) leste; b) norte da bacia do Rio Pardo (curva verde: 2001; curva vermelha: 2016).

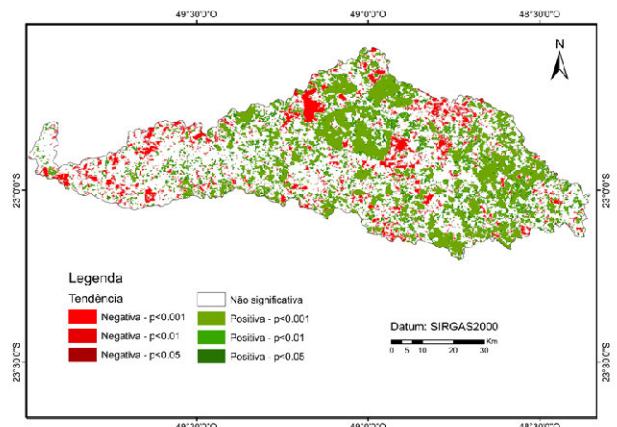


Figura 9. Bacia do Rio Pardo: áreas de tendência significativa (positiva e negativa) a 95 % (p<0,05), 99 % (p<0,01) e 99,9 % (p<0,001) de significância.

**TABELA III**  
TENDÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA E NÍVEIS DE SIGNIFICÂNCIA: ÁREA EM KM<sup>2</sup> E PORCENTAGEM DA ÁREA TOTAL

TENDÊNCIA E SIGNIFICÂNCIA	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	ÁREA (%)
Tendência negativa - p<0,001	286,06	5,96
Tendência negativa - p<0,01	441,63	9,2
Tendência negativa - p<0,05	652,16	13,58
Tendência positiva - p<0,05	1.645,03	34,26
Tendência positiva - p<0,01	1.356,53	28,25
Tendência positiva - p<0,001	1.097,06	22,85
Tendência não significativa em nenhum nível de significância	2.504,28	52,16
<b>TOTAL</b>	<b>4.801,47</b>	<b>100</b>

A Tabela IV apresenta a área ocupada pelas classes de uso da terra da bacia do Rio Pardo com significância positiva, negativa e com tendência não significativa (p<0,001).

**TABELA IV**

ÁREA DAS CLASSES DE USO DA TERRA COM SIGNIFICÂNCIA POSITIVA, NEGATIVA E SEM SIGNIFICÂNCIA (P<0,001)

USO DA TERRA	TENDÊNCIA (P<0,001)	ÁREA (KM <sup>2</sup> )	ÁREA (%)
Mata nativa	não significativa	449,64	9,37
	negativa	24,60	0,51
	positiva	159,17	3,32
Laranja	não significativa	239,34	4,99
	negativa	13,75	0,29
	positiva	248,83	5,18
Açude	não significativa	15,23	0,32
	negativa	2,24	0,05
	positiva	4,88	0,10
Eucalipto	não significativa	311,60	6,49
	negativa	14,26	0,30
	positiva	347,45	7,24
Pinus	não significativa	106,25	2,21
	negativa	17,29	0,36
	positiva	53,41	1,11
Culturas anuais	não significativa	1.334,68	27,80
	negativa	132,80	2,77
	positiva	133,29	2,78
Pastagem	não significativa	921,17	19,19
	negativa	56,08	1,17
	positiva	146,86	3,06
Zona urbana	não significativa	40,45	0,84
	negativa	25,03	0,52
	positiva	3,18	0,07
<b>TOTAL</b>		<b>4.801,47</b>	<b>100</b>

Os dados da Tabela IV mostram que, no total, 3.418,35 km<sup>2</sup>, ou mais de 71 % da superfície da bacia do Rio Pardo não apresentam tendência significativa de EVI, com destaque para as culturas anuais e para as pastagens, cuja área total sem tendência perfaz 47,7 % da área total da bacia. Para compreender melhor a tendência sazonal e interanual das culturas anuais, no entanto, é necessário fazer um levantamento histórico dos cultivos implantados em cada área agrícola ao longo da série temporal, assim como suas datas de plantio. Merecem também destaque as florestas (mata nativa, eucalipto e pinus) e as lavouras de laranja, que por apresentarem elevada densidade de cobertura do solo e fechamento do dossel em relação aos outros usos da terra e serem culturas perenes ou naturais (mata nativa), apresentam menor suscetibilidade às flutuações climáticas.

As culturas agrícolas que apresentaram maior área com tendência significativa positiva, porém, foram eucalipto, laranja, mata nativa e pastagem, na ordem decrescente, seguidas das culturas anuais. No entanto, apenas as culturas de eucalipto e laranja apresentaram área com tendência positiva superior às áreas com tendência não significativa. Nas culturas anuais, por exemplo, a área com tendência positiva equivale a 10 % da área sem tendência. As razões para a tendência a aumento do teor de verde da vegetação já foram aqui discutidas, e podem estar relacionadas às mudanças climáticas globais.

Em relação às tendências significativas negativas, apenas as culturas anuais e as pastagens apresentam áreas superiores a 2 % e 1 %, respectivamente, da bacia do Rio Pardo. Para a compreensão deste comportamento, faz-se necessário analisar o uso da terra em todos os anos da série temporal e, no caso das culturas anuais, os dois ciclos anuais.

A Figura 10 apresenta o mapa do coeficiente Z de significância Mann-Kendall do operador de tendência interanual TS Slope da série temporal de EVI da bacia do Rio Pardo.

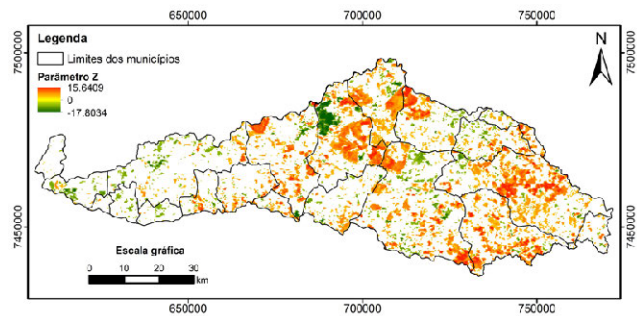


Figura 10. Coeficiente Z de significância Mann-Kendall do operador TS Slope da série temporal de EVI (2001-2016) da bacia do Rio Pardo.

Como o coeficiente Z é calculado com média padronizada de 0 e desvio padrão 1, admite-se que os valores Z situados entre -3 e +3 desvios padrões integram a distribuição normal dos dados. Neste mapa, foram excluídos os pixels de tendência não significativa a 99,9 % de significância e, como resultado, todos os pixels que apresentaram desvio padrão no intervalo da distribuição normal foram excluídos do mapa. Assim, quanto mais distantes de -3 (valores menores) e de +3 (valores maiores), maior é a probabilidade de o dado constituir um outlier, ou seja, um dado discrepante, apresentando tendência. Na bacia do Rio Pardo, em linhas gerais, apresentaram coeficiente Z positivo com tendência significativa os cultivos de laranja, eucalipto e pinus, além dos açudes e das matas nativas, e coeficiente Z negativo com tendência significativa as culturas anuais e zonas urbanas.

A Figura 11 apresenta os valores medianos do operador TS Slope da imagem do ângulo de Fase 1, que indica a posição temporal do pico de verdor anual, ou seja, o ponto de início da onda senoidal, de áreas com tendência significativa a 99,9 % de significância.

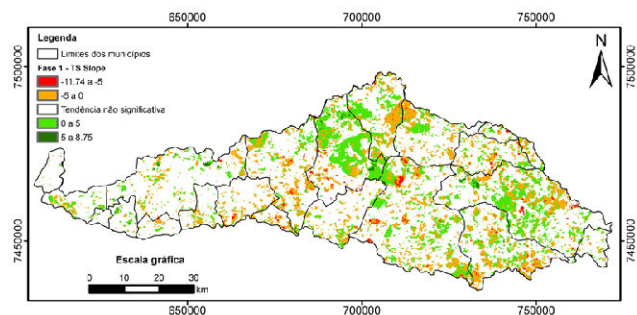


Figura 11. Tendência Theil-Sen de posição temporal do pico anual de verde (fase 1) da série temporal de EVI (2001-2016) da bacia do Rio Pardo.

O mapa indica a tendência de início do pico de verdor da vegetação. Valores positivos evidenciam tendência de antecipação do pico de atividade fotossintética da vegetação, e valores negativos, tendência de retardamento desse período fenológico. Cada ângulo corresponde a, aproximadamente, um dia. Embora todas as classes de uso da terra tenham apresentado tendência de alteração positiva e negativa no ângulo de fase, as culturas anuais apresentam tendência negativa, e culturas como eucalipto, laranja e pinus, tendência positiva. Estes dados podem subsidiar os produtores rurais e órgãos de extensão rural no planejamento agrícola das propriedades.

A Análise de Tendência Sazonal pode ser aplicada também na escala municipal para subsidiar o poder público com informações para a gestão rural e ambiental. Os gráficos da Figura 12 a seguir comparam as curvas sazonais observadas nos cin-

co primeiros anos (2001-2005) e nos últimos cinco anos (2012-2016) da série temporal em dois municípios da bacia do Rio Pardo dominados por diferentes usos da terra.

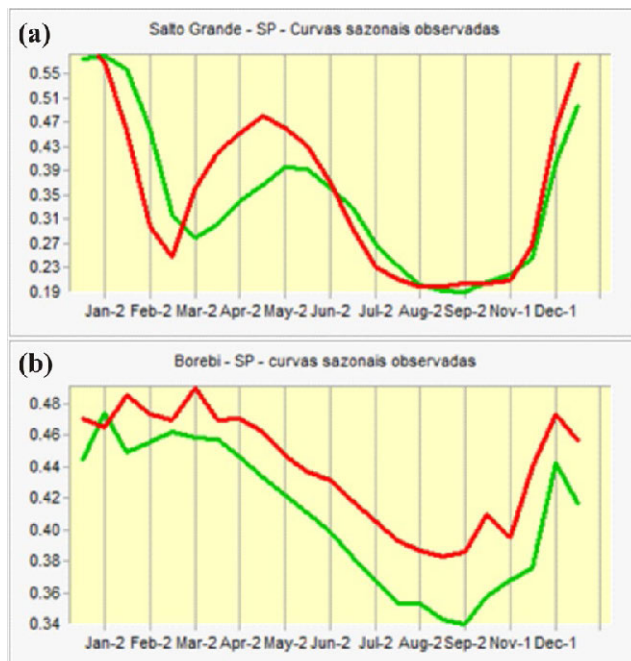


Figura 12. Curvas sazonais observadas (série temporal: 2001-2016): a) município de Salto Grande - SP; b) município de Borebi - SP (curva verde: 2001-2005; curva vermelha: 2012-2016).

Embora nenhum dos municípios tenha sido analisado na totalidade de sua área, já que partes deles não integram a bacia do Rio Pardo, ambos apresentaram comportamentos distintos de tendência do índice de vegetação EVI nos anos iniciais e finais da série temporal. O município de Salto Grande, no qual predominam as culturas anuais, com destaque para a soja (verão), o milho (verão e inverno), o trigo (inverno) e a cana-de-açúcar (todo o ano), além de mata nativa e pastagem, apresentou curvas sazonais equivalentes a dois ciclos anuais de cultivo, um deles iniciando-se em março no período 2001-2005 e em fevereiro no período 2011-2016, com término em agosto (culturas de inverno), e o outro iniciando em novembro e terminando em março (período 2001-2005) ou fevereiro (período 2012-2016). Observam-se também o aumento nos valores de EVI nos anos finais da série temporal no período de março a junho e em dezembro, períodos de máxima atividade fotossintética da vegetação nos cultivos de inverno e verão, respectivamente. Já o município de Borebi, amplamente dominado pelo cultivo de eucalipto e, secundariamente, de pinus, apresenta curvas sazonais observadas típicas dos respectivos cultivos, com aumento do índice EVI no período chuvoso (outubro a março) e redução no período seco (abril a setembro). Comparado aos anos iniciais da série, os anos finais apresentam apenas aumento nos valores medianos de EVI nos meses de outubro, fevereiro e março, e pequena redução no mês de janeiro.

#### IV. CONCLUSÕES

A análise de tendência sazonal e interanual do índice de verde da vegetação da bacia hidrográfica do Rio Pardo por meio do índice de vegetação EVI pela técnica STA possibilitou uma primeira aproximação da compreensão da fenologia vegetal das principais culturas agrícolas e florestas naturais e cultivadas,

com destaque para as estações verdes e marrons (browning season, estação de perda da clorofila das plantas) e as suas tendências nos primeiros e últimos anos da série temporal, evidenciadas pelos parâmetros de forma mediana.

Em geral, os usos da terra agrícolas e naturais apresentaram tendência de aumento dos valores EVI ao longo de todos os meses, estações e durante a série temporal. Tal comportamento pode estar relacionado às mudanças climáticas, que propiciaram o aumento da precipitação, das temperaturas e a melhoria da disponibilidade hídrica no solo, e a fatores como manejo do solo e das pragas, época de plantio e colheita, evolução dos sistemas de cultivo, entre outros. Em relação às mudanças climáticas, os aumentos de temperatura já registrados no estado de São Paulo nas últimas décadas propiciaram o aumento do desenvolvimento vegetal, mas os cenários de maior aumento da temperatura média poderão levar a área de estudo à redução da produtividade agrícola e a restrições ao cultivo de vários produtos, conforme destacado por Oliveira & Alves (2011). Eastman et al. (2013) constataram aumento nos valores médios anuais de NDVI e da produtividade vegetal nas florestas de folhas largas e em coníferas, o aumento da amplitude anual de NDVI nas pastagens e florestas semidecíduais tropicais e temperadas, sendo o fator restritivo no período seco a umidade do solo, e o aumento do NDVI no período úmido nos biomas frios da tundra e da taiga. Os autores sugeriram que tais alterações são consequências das mudanças climáticas globais (aumento das temperaturas médias, principalmente).

No entanto, para compreender melhor as mudanças climáticas e seus impactos na agricultura e no uso da terra, recomenda-se realizar a análise de tendência sazonal e interanual dos elementos climáticos, como temperatura, precipitação e umidade do solo e do ar, pelo período mínimo de trinta anos. Destaca-se ainda a necessidade de ampliar a série temporal de imagens EVI, para possibilitar a compreensão de seu comportamento em períodos anteriores a 2001.

Com relação às culturas anuais, a variedade de culturas agrupadas em uma única classe, seus calendários de cultivo e colheita, a variedade de culturas plantadas em uma mesma área ao longo da série temporal, o manejo adotado, entre outros fatores, prejudicaram a qualidade dos resultados da análise de tendência sazonal, sendo o comportamento das curvas observadas no município de Salto Grande, tal como indicado na Figura 12.a, a característica mais provável das culturas anuais em geral no período analisado. Nesse sentido, recomenda-se a análise do uso da terra nos campos de culturas anuais ao longo de toda a série temporal e a separação das mesmas em diferentes classes conforme os tipos e combinações de culturas existentes, assim como a separação das lavouras de cana-de-açúcar para a análise de tendência sazonal, pois seu calendário de cultivo e colheita difere do das demais culturas anuais. Sugere-se ainda a adoção de quatro harmônicas para o cálculo da regressão harmônica das culturas anuais, pois apesar de constituir um modelo mais complexo, pode modelar de forma mais eficaz os dois ciclos anuais apresentados pelas referidas culturas.

A análise de significância Mann-Kendall da série temporal permitiu diferenciar as áreas de tendência significativa das áreas sem tendência de mudanças no índice EVI de acordo com diferentes níveis de confiança, assim como avaliar o grau de significância da tendência por meio do coeficiente Z. No entanto, recomenda-se nos próximos trabalhos a análise de significância pela abordagem Mann-Kendall Contextual (CMK), apresentada por Neeti & Eastman (2011) e disponível a

partir da versão Selva do SIG Idrisi, que leva em consideração a autocorrelação espacial entre pixels vizinhos e permite a redução na detecção de tendências espúrias e a ampliação da confiabilidade da tendência quando esta estiver presente.

No presente trabalho, foi dado enfoque à análise das tendências sazonais e interanuais das classes identificadas no mapa de uso da terra de julho/agosto de 2016. Recomenda-se, portanto, em trabalhos futuros, a separação e análise das classes de tendência sazonal de acordo com as combinações de va-

lores das Amplitudes e Fases sobre as composições coloridas análogas geradas pela ferramenta STA para auxílio à interpretação dos resultados, tal como realizado por Eastman et al. (2013) e Teferi, Uhlenbrook, & Belket (2015). Tal análise permitirá a identificação das áreas com aumento ou redução dos valores médios anuais de EVI, da amplitude do ciclo anual, do ângulo de fase, e das combinações entre esses parâmetros.

## REFERÊNCIAS

- Araújo Jr., A. A., Campos, S., Barros, Z. X., & Cardoso, L. G. (2002). Diagnóstico físico conservacionista de 10 microbacias do Rio Capivara - Botucatu (SP), visando o uso racional do solo. *Irriga*, 7(2), 107-121. <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2002v7n2>
- Brasil. Lei n. 12.727, de 17 de outubro de 2012. (2012). Brasília, DF: Diário Oficial da União, ano CXLIX, n. 202, p. 1-3, 18 out. 2012. Seção 1. [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2011-2014/2012/lei/l12727.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12727.htm)
- Centro de Previsão do Tempo e Estudos Climáticos. (2016). El Niño. São José dos Campos: CPTEC/INPE. <http://enos.cptec.inpe.br/elnino/pt>
- Comitê da Bacia Hidrográfica do Médio Paranapanema. (2007). Plano de bacia da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Paranapanema (UGRHI-17). São Paulo: CBH-MP. [www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7037/planobacia-mp-caderno.pdf](http://www.sigrh.sp.gov.br/public/uploads/documents/7037/planobacia-mp-caderno.pdf)
- Demarchi, J. C. & Piroli, E. L. Análise dos efeitos de geadas na cobertura vegetal do município de Cândido Mota - SP, Brasil, por meio de índices de vegetação. (2015). *Boletim Goiano de Geografia*, 35(3), 554-573. <https://doi.org/10.5216/bgg.v35i3.38843>
- Eastman, J. R. (2009a). Idrisi Taiga Manual - version 16. Worcester: Clark Labs.
- Eastman, J. R. (2009b). Idrisi Taiga - GIS and Image Processing Software - version 16. Worcester: Clark Labs (software).
- Eastman, J. R., Sangermano, F., Ghimire, B., Zhu, H., Chen, H., Neeti, N., Cai, Y., ..., Crema, S. (2009). Seasonal trend analysis of image time series. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), 2721-2726. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160902755338>
- Eastman, J. R., Sangermano, F., Machado, E. A., Rogan, J. & Anyamba, A. (2013). Global Trends in Seasonality of Normal Difference Vegetation Index (NDVI), 1982-2011. *Remote Sensing*, 5(10), 4799-4818. <http://doi.org/10.3390/rs5104799>
- Environmental Systems Research Institute. (2010). ArcGIS / ArcMap. Professional GIS for the desktop, release 10. Redlands: ESRI (software).
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2010). Cidades@: dados do Censo Demográfico 2010. Rio de Janeiro: IBGE. <https://cidades.ibge.gov.br/>
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2004). Mapa de vegetação do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE. (escala: 1:500.000).
- Justice, C. O., Vermote, E., Townshend, J. R. G., Defries, R., Roy, D. P., Hall, D. K., Salomonson, V. V., ..., Barnsley, M. J. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS): Land Remote Sensing for Global Change Research. (1998). *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(4), 1228-1249. <http://doi.org/10.1109/36.701075>
- Miranda, M. J., Pinto, H. S., Zullo Jr., J., Fagundes, R. M., Fonseca, D. B., Calve, L., & Pellegrino, G. Q. (2005). Clima dos municípios paulistas. Campinas: CEPAGRI/UNICAMP. <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima-dos-municipios-paulistas.html>
- Mishra, N. B. & Chaudhuri, G. (2015). Spatio-temporal analysis of trends in seasonal vegetation productivity across Uttarakhnad, Indian Himalayas, 2000-2014. *Applied Geography*, 56, 29-41. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.10.007>
- Neeti, N. & Eastman, J. R. (2011). A Contextual Mann-Kendall Approach for the Assessment of Trend Significance in Image Time Series. *Transactions in GIS*, 15(5), 599-611.
- Oliveira, J. B., Camargo, M. N., Rossi, M., & Calderado Filho, B. (1999). Mapa pedológico do Estado de São Paulo. Campinas: IAC (escala: 1:500.000).
- Oliveira, R. D. F. & Alves, J. W. S. (2011). Mudanças climáticas globais no Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria de Meio Ambiente.
- Piroli, E. L. (2013). Geoprocessamento aplicado ao estudo do uso da terra das áreas de preservação permanente dos corpos d'água da bacia hidrográfica do Rio Pardo (Tese de livre-docência, Universidade Estadual Paulista). <http://www.ourinhos.unesp.br/#!/pesquisa/grupos-de-estudo/cediaggeo/materiais/geoprocessamento/dissertacoes-e-teses/>
- Ross, J. L. S. & Moroz, I. C. (1997). Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. São Paulo: FFLCH-USP. (escala: 1:500.000).
- São Paulo. (2009). Inventário florestal da vegetação nativa do Estado de São Paulo. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente; Instituto Florestal; Biota/Fapesp; FundAg. <http://arquivos.ambiente.sp.gov.br/sifesp/2013/12/mapainventario.pdf>
- Teferi, E., Uhlenbrook, S., & Bewket, W. (2015). Inter-annual and seasonal trends of vegetation condition in the Upper Blue Nile (Abay) Basin: dual-scale time series analysis. *Earth System Dynamics*, 6, 617-636. <http://doi.org/10.5194/esd-6-617-2015>.



# Uso de SIG para análises de impactos da expansão urbana sobre morfologias do relevo nas zonas leste e sul do município de Marília (São Paulo, Brasil)

Santos, Vanessa Ramos dos<sup>1</sup>, Tommaselli, José Tadeu Garcia<sup>2</sup>, Piroli, Edson Luís<sup>3</sup>.

1 Programa de Pós-Graduação em Geografia/Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)/Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Câmpus de Presidente Prudente  
Presidente Prudente/São Paulo/Brasil  
vanessa@ourinhos.unesp.br

2 Programa de Pós-Graduação em Geografia/Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT)/Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Câmpus de Presidente Prudente  
Presidente Prudente/São Paulo/Brasil  
tadeutommaselli@gmail.com

3 Docente do curso de Geografia/Câmpus Experimental de Ourinhos/Universidade Estadual Paulista (Unesp) - Câmpus Experimental de Ourinhos  
Ourinhos/São Paulo/Brasil  
piroli@ourinhos.unesp.br

## RESUMO

A necessidade tida pela sociedade em planejar e organizar o espaço em que está contida e se relaciona, busca apoio em diferentes técnicas e áreas do conhecimento. O uso de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), tornou-se importante aliado no mapeamento e espacialização das informações, e um mecanismo viável para as análises sobre espaço e base para tomadas de decisões. O uso dos SIG para análises de impactos da expansão urbana sobre morfologias do relevo pode facilitar a vida dos planejadores pois estes permitem a manipulação e realização de análises complexas ao integrar grandes volumes de dados. O objetivo desse trabalho foi analisar informações sobre o meio físico e sobre a expansão urbana nas zonas leste e sul do município de Marília (São Paulo, Brasil). As informações consideradas foram sobre as características do contexto geológico, dos solos, da geomorfologia, da suscetibilidade a erosão, do zoneamento urbano e das informações sobre inclusão e exclusão social nas zonas estudadas. Essas informações foram trabalhadas em ambiente SIG, no qual foram realizados cruzamentos entre os mapas. O produto desses cruzamentos refere-se aos mapas de inclusão/exclusão social em classes de declives nas zonas analisadas. Os mapas e dados obtidos mostram que, embora num mesmo contexto de fragilidade ambiental, a expansão urbana na zona leste apresenta baixa vulnerabilidade social, enquanto que é alta na zona sul. Conclui-se, portanto, que para as análises dos impactos da expansão urbana sobre morfologias do relevo, o uso de SIG permitiu análises e a interpretações dos resultados com precisão e segurança.

Palavras chave: **Impactos, expansão urbana, morfologias do relevo, geoprocessamento, município de Marília (São Paulo, Brasil).**

## ABSTRACT

*The society necessity to plan and organize the space in which it is contained and related, is supported in different techniques and knowledge areas. The use of Geographic Information Systems (GIS) has become an important allied in the mapping and information spatialization, and a viable mechanism for space and base analysis for making decision. The GIS are used to analyze the impacts of urban expansion on terrain relief morphologies, it can be able to be easier for planners because they allow the manipulation and accomplishment of complex analyzes by integrating large data volumes. The objective of this*

work was analyzed informations about the physical environment and urban expansion in the eastern and southern zones of the Marília municipality (São Paulo, Brazil). The informations considered were the characteristics of geological context, soils, geomorphology, susceptibility to erosion, urban zoning and information on social inclusion and exclusion in the studied areas. These informations were worked in a GIS, in which crossings between the maps were accomplished. The product of these crossings refers to social inclusion/exclusion maps in slope classes in the analyzed areas. The maps and data obtained show that, although in the same context of environmental fragility, urban expansion in the eastern zone presents low social vulnerability, while it is high in the south. It was concluded, therefore, that for the analysis of the impacts of urban expansion on relief morphologies, the use of GIS allowed for analysis and interpretation of the results with precision and security.

**Keywords:** *Impacts, urban expansion, relief morphologies, geoprocessing, Marília municipality (São Paulo, Brazil).*

## I. INTRODUÇÃO

O presente estudo é fundamentado na relação entre a expansão urbana e o meio físico. Tal relação, muitas vezes desconexa e conflitante, tende a gerar a degradação do ambiente urbano, (re)configurando esse espaço às múltiplas relações entre a população e o quadro natural, ao longo do tempo (Geológico e cronológico).

Essas múltiplas relações evidenciam, na maioria dos casos, degradações ao meio físico no espaço urbano. Entre as degradações ambientais urbanas mais evidentes tem-se a retirada de matas, a ocupação das áreas de preservação permanente, a poluição e erosão do solo, contaminação dos aquíferos e assoreamento dos rios e córregos.

Essas situações têm como suporte as morfologias do relevo para se desenvolverem, sendo este componente do meio físico a base para as diversas alterações.

No que tange ao entendimento do relevo como suporte para o espaço urbano, sabe-se que as alterações sobre as morfologias do relevo promovem o surgimento de 'novos' cenários enormemente diversificados de ambientes. Essas alterações modificam o dinamismo harmonioso, até então presente nos ambientes naturais.

Nesse contexto, nos ambientes urbanos

*(...) os solos naturalmente já existentes encontram-se revolvidos, danificados e impermeabilizados pela pavimentação das ruas e pelas edificações de casas, indústrias e por toda gama de equipamentos e serviços urbanos dos quais a população necessita (BRANCO; CAVINATTO, 1999 apud SANTOS, 2017).*

Entretanto, essas mudanças não atingem igualmente todo espaço urbano, e sim atingem muito mais áreas ocupadas por populações de baixa renda, que carecem da infraestrutura sólida e básica necessária para as habitações. Por outro lado, as populações com alto poder aquisitivo se apropriam dos espaços, implantando a infraestrutura necessária para seu desenvolvimento.

Tem-se, portanto, diferentes formas de ocupação e apropriação do meio físico urbano desencadeando em variados impactos ao espaço e ao homem.

Nesse contexto, o uso de SIG, atrelado às demais geotecnologias, torna-se suporte para implementação das análises sobre os impactos nos ambientes urbanos.

Essas ferramentas dinamizam a produção de informações espaciais, já que possibilitam a manipulação e cruzamento de

grandes volumes de dados, o que melhora o manejo e a interpretação das informações trabalhadas.

Com base nessa temática, o objetivo do presente estudo foi analisar informações sobre o meio físico e sobre a expansão urbana nas zonas leste e sul do município de Marília (São Paulo, Brasil). O trabalho consistiu na fundamentação teórico-metodológica sobre relevo em áreas urbanas e sobre uso de SIG em análises das informações e planejamento de áreas urbanas.

As informações consideradas foram relativas às características do contexto geológico, dos solos, da geomorfologia, da suscetibilidade à erosão, do zoneamento urbano e das informações sobre inclusão e exclusão social nas zonas estudadas. Essas informações foram trabalhadas em ambiente SIG, no qual foram aplicadas técnicas de álgebra entre os mapas.

Esse trabalho se originou de pesquisa de mestrado desenvolvida junto a Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus de Presidente Prudente, intitulada "Análise temporal de impactos sobre morfologias do relevo nas zonas leste e sul da área urbana de Marília, São Paulo, Brasil".

## II. MÉTODO

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA

O presente estudo se propõe a abordar o uso de SIG para análises de impactos da expansão urbana sobre morfologias do relevo.

De acordo com Ross (2012), toda ação humana sobre o ambiente natural gera impactos em diferentes graus de agressão, provocando, muitas vezes, processos irreversíveis. No caso da expansão urbana sobre as morfologias do relevo, os impactos causados estão associados a:

*(...) expansão descontrolada, traçado inadequado do sistema viário (sentido preferencial da água), precariedade do sistema de captação e drenagem de águas pluviais, assoreamento de corpos d'água, destruição de loteamentos, residências e de equipamentos e obras urbanas de um modo geral (SALOMÃO; IWASA, 1995, apud SANTOS, 2017).*

Entretanto tais impactos não atingem igualmente todo espaço urbano, atingem muito mais os ambientes ocupados pelas classes sociais menos favorecidas do que pelas classes mais abastadas.

Tal situação decorre das formas de produção do espaço urbano, associadas à dinâmicas e estruturação relacionadas à apropriação e ocupação das morfologias do relevo.

Os processos relacionados à apropriação das morfologias do relevo estão associados às populações de alta renda. Já os

processos tidos como ocupação de ambientes urbanos estão relacionados às populações de menor poder aquisitivo.

Ross (1994), retrata que os impactos causados pelas diferentes formas de produção do espaço urbano são considerados como fragilidade ambiental e vulnerabilidade social. O autor destaca que a fragilidade ambiental é determinada pela estrutura física dos ambientes naturais antropizados e a vulnerabilidade está relacionada com o grupo social ocupante em determinada área (SANTOS, 2017).

Nesse cenário emerge a necessidade de planejamento e, com ele, do uso de ferramentas que auxiliem na minimização dos impactos negativos à população, à gestão pública e ao meio natural.

O uso das geotecnologias “tornou-se importante aliado no mapeamento e espacialização das informações, tornando-se um mecanismo viável para as análises sobre espaço e base para tomadas de decisões” (SANTOS, 2017).

Neste contexto, o uso dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG) permite aos planejadores e gestores a integração de vários atributos, a manipulação de grandes volumes de dados e a realização de análises complexas sobre os ambientes urbanos.

**ÁREA DE ESTUDO**

A área estudada compreendeu as zonas sul e leste do sítio urbano do município de Marília, localizado na região centro-oeste do estado de São Paulo.

A área urbana da cidade localiza-se sobre o Planalto Residual de Marília, num contexto de relevo tabuliforme, parte ocidental da serra de Agudos, no divisor de águas das bacias hidrográficas dos rios Aguapeí e Peixe. Essa área está situada a uma altitude média de 650 metros, sendo recortada por escarpas de declive acentuado, que atingem mais de 100 metros de desnível (SANTOS, 2017). A Figura 1 mostra a localização do município de Marília (São Paulo, Brasil).

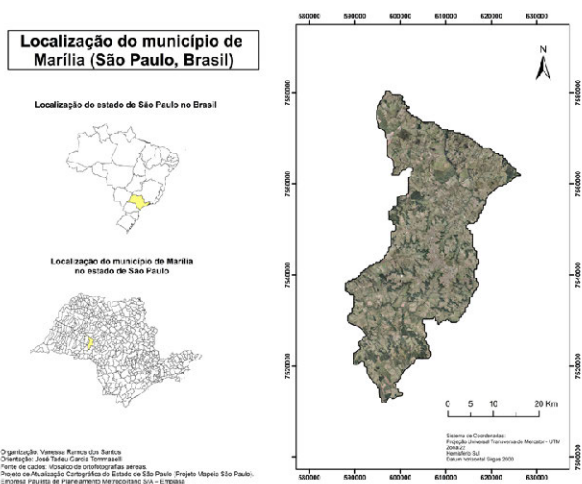


Figura 1. Localização do município de Marília (São Paulo, Brasil).

Como exemplo e área de estudo, em Marília, áreas de apropriação das características naturais, são percebidas na zona leste urbana do município representadas por loteamentos fechados e de alto poder aquisitivo; enquanto que na zona sul, verificam-se áreas de ocupação até o limite das escarpas, com graves problemas de degradação natural e social do espaço, caracterizadas por habitações em situação precária e, em alguns casos, em condição de risco de desabamento. As Figuras 2 e 3 mostram as zonas leste e sul, respectivamente, áreas pesquisadas apresentadas nesse estudo.

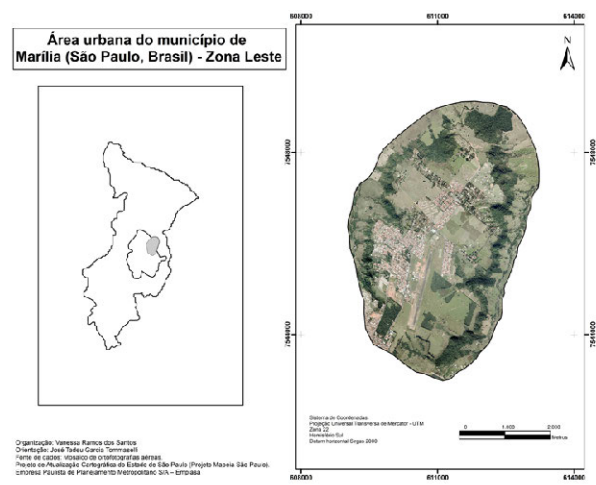


Figura 2. Localização da zona leste da área urbana de Marília (São Paulo, Brasil).

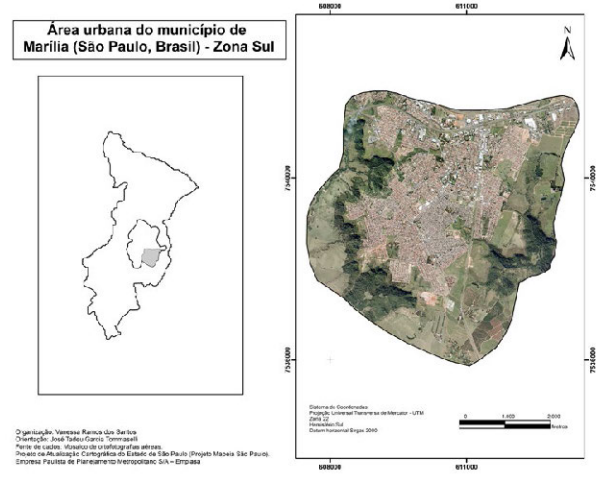


Figura 3. Localização da zona leste da área urbana de Marília (São Paulo, Brasil).

**MATERIAIS**

A base de dados compreendeu:

- Mapa Geológico do estado de São Paulo (1:500.000) (IPT, 1981).
- Mapa Pedológico do estado de São Paulo (1:500.000) (EMBRAPA, 1999).
- Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo (1:500.000) (ROSS; MOROZ, 1997) e Mapa Geomorfológico do perímetro urbano de Marília - SP (1:8.000) (SANTOS, 2009).
- Mapa de Suscetibilidade à erosão do estado de São Paulo (1:250.000) (KERTZMAN et al., 1995).
- Mapa de Inclusão/Exclusão social Marília (MELAZZO, 2012).
- Fotografias aéreas ortorretificadas, do ano de 2010.
- Imagens do satélite Land Remote Sensing Satellite (Landsat) 8, sensor Operational Land Imager (OLI) bandas 4, 5, 6 e 8, do ano de 2015.
- Dados de altitude extraídos da missão de mapeamento topográfico da Terra, denominada Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).
- Base de dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 1973).

**PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS**

Os procedimentos metodológicos consistiram no uso do SIG ArcGIS, versão 10.3 para elaboração do mosaico de imagens,

composição das bandas, extração dos dados de declividade e cruzamento das informações.

- Mosaico de imagens: esta etapa foi realizada no SIG ArcGIS, aplicando-se o módulo Composite Bands (etapas: Data Management Tools-Raster-Raster Processing). Em seguida, foi feito o georreferenciamento das imagens do satélite Landsat 8 e SRTM, utilizando o módulo Georeferencing do ArcGIS. As fotografias aéreas foram obtidas georreferenciadas e na sequência foram mosaicadas no SIG ArcGIS. Posteriormente, todos os dados foram reamostrados, georreferenciando-se novamente a partir de uma base comum para que as localizações de todo conjunto da base cartográfica tivessem as mesmas coordenadas.
- Para a elaboração da carta clinográfica da área urbana de Marília, a imagem SRTM com informações de altitude foi inserida no SIG ArcGIS para extração dos dados de declividade. Essa etapa consistiu na aplicação do módulo Slope, da ferramenta 3D Analyst Tools - Raster Surface.

A classificação das informações sobre declividade foi baseada em De Biasi (1992 apud SANTOS, 2017), cuja definição da chave de classes se apoiou em regulamentações estabelecidas por lei para os diferentes usos e ocupação territorial e, também, em usos consagrados de certo limites de classes definidos através de trabalhos acadêmicos. A definição das classes de declividades para serem utilizadas na elaboração da carta clinográfica, atende a um espectro bem amplo no que diz respeito à sua utilização na representação cartográfica, para os mais variados usos e ocupação do espaço, seja ele urbano ou agrícola (DE BIASI, 1992, p. 47).

O autor (De Biasi, 1992, apud SANTOS, 2017), define os seguintes limites, em porcentagem, para a chave de classes adotadas:

- <5% - Limite urbano-industrial, utilizados internacionalmente, bem como em trabalhos de planejamento urbano efetuados pelo IPT e pela EMLASA.
- 5-12% - Limite máximo para o emprego de mecanização agrícola.
- 12-30% - Limite máximo para urbanização sem restrições (Lei federal nº 6766/79), a partir do qual toda e qualquer forma de parcelamento far-se-á através de exigências específicas.
- 30-47% - Limite máximo de corte raso, a partir do qual a exploração só será permitida se sustentada por cobertura de florestas (Lei federal nº 4771/65).
- >47% - Classe adotada pelo autor com base no Artigo 10º do Código Florestal (Lei federal nº 4771) de 1965, o qual previa que na faixa situada entre 25° (47%) a 45° (100%), “não é permitida a derrubada de florestas, só sendo tolerada a extração de toros, quando em regime de utilização racional, que vise a rendimentos permanentes”. No atual Código Florestal brasileiro, o Artigo 11º da Lei 12.651/2012 regulamentada que em áreas de inclinação entre 25° e 45°, serão permitidos o manejo florestal sustentável e o exercício de atividades agrossilvipastoris, bem como a manutenção da infraestrutura física associada ao desenvolvimento das atividades, observadas boas práticas agrônomicas, sendo vedada a conversão de novas áreas, excetuadas as hipóteses de utilidade pública e interesse social.
- Cruzamento das informações: as informações da carta clinográfica foram cruzadas com os dados de inclusão e exclusão, pelo modo Raster Calculator (em Spatial Analyst Tools - Map Algebra). O produto resultante desse cruzamento também foi comparado com as informações obtidas nos demais materiais cartográficos. Após a organização da

base cartográfica da área de estudo, foram realizadas as análises sobre o avanço dos bairros nas áreas estudadas (SANTOS, 2017).

### III. RESULTADOS

Na relação entre o quadro natural e as formas de ocupação e apropriação em Marília, as diferenças entre as formas de produção do espaço urbano e a relação com as dinâmicas naturais são evidentes. Nas áreas cujas formas de produção ocorrem por apropriação do espaço, verifica-se que há também a incorporação das características naturais na valorização financeira dessas áreas.

Já nos espaços tidos por ocupação pode-se notar que há graves problemas de degradação do quadro natural e ao homem. Esses locais estão ocupados até o limite da linha de ruptura do relevo e apresentam falta de cobertura vegetal, impermeabilização das cabeceiras, arruamentos no sentido da vertente, assoreamento dos córregos e lançamento de esgoto in natura sobre o solo e sobre as águas.

Após os cruzamentos das informações realizados no ArcGIS, foi gerado o mapa de inclusão/exclusão social por classes de declives ocorrentes nas leste e sul da área urbana de Marília.

A Figura 4 refere-se ao mapa de inclusão/exclusão social em classes de declives na zona leste.

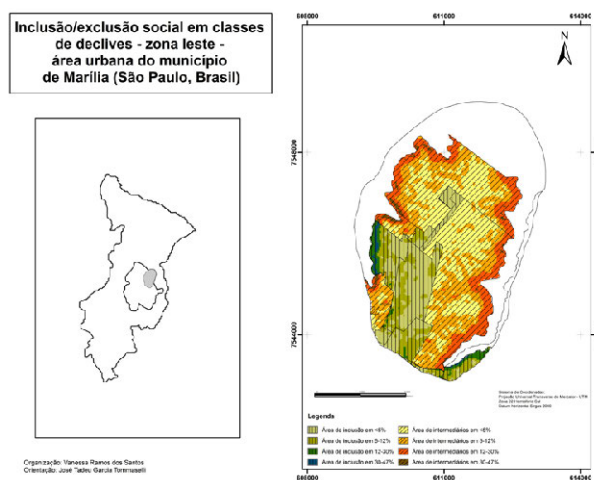


Figura. 4. Mapa de inclusão/exclusão social em classes de declives na zona leste da área urbana de Marília (São Paulo, Brasil).

A análise do mapa destaca que a zona leste de Marília possui áreas de inclusão social e de intermediários nas classes <5%, entre 5-12%, entre 12-30% e entre 30-47%. As áreas de inclusão e intermediários em classes referentes a média e alta declividade (classes 12-30% e 30-47%) localizam-se, principalmente, na faixa próxima da escarpa do planalto.

A observação do mapa também permite verificar que na zona leste não há áreas de exclusão social.

Considerando o que foi definido por De Biasi (1992), para o limite máximo da urbanização sem restrições (classe 12-30%), observa-se no mapa que na zona leste há o avanço da expansão urbana sobre a classe entre 30-47% de declividade. Entretanto, tal avanço refere-se a áreas de inclusão social e intermediários.

Os dados obtidos pelo mapa de inclusão/exclusão social, quando comparados com as características da fragilidade ambiental (características geológicas, dos solos, do relevo e de suscetibilidade à erosão), mostram que a expansão urbana na zona leste

apresenta baixa vulnerabilidade social. Nessas áreas, a baixa vulnerabilidade social é devida às formas de apropriação do espaço, que apresenta planejamento e infraestrutura prévia para a implantação dos loteamentos, como ruas paralelas ao sentido da escarpa, manutenção de vegetação e isolamento da linha de ruptura do planalto, áreas verdes e calçamento de modo a permitir a infiltração e diminuir o escoamento superficial e a condição alto e médio padrão das habitações. A faixa próxima a escarpa, quando analisada no Mapa da Lei do Zoneamento e Uso do solo, evidencia que essas áreas são caracterizadas como zonas residenciais com baixa e média densidade. Esse fator reforça a baixa vulnerabilidade social da zona leste, pois a taxa de ocupação do solo é menor.

Constata-se, portanto, que mesmo a expansão urbana ultrapassando restrições em função da classe de declive (além de 30%), as características de implantação das estruturas, o padrão das habitações e baixa densidade permitem o baixo risco à população assentada na zona leste. Verifica-se que há, inclusive, a incorporação das características do meio físico na valorização dos loteamentos.

Após elaboração do mapa de inclusão e a exclusão social em classes de declives, foram realizados trabalhos de campo nas áreas próximas à escarpa do planalto. Esses pontos, representativos das condições da área estudada, foram identificados no mapa de inclusão e exclusão social em classes de declive e previamente nas imagens de satélites e fotografias aéreas.

As Figuras 5 e 6 mostram as características do espaço urbano na zona leste de Marília, destacando a implantação da infraestrutura urbana, previamente à chegada dos habitantes e a estrutura de condomínio fechado, que incorpora aspectos do meio físico na valorização do espaço urbano na zona leste.

A Figura 7 destaca o mapa de inclusão/exclusão social em classes de declives na zona sul, da área urbana de Marília.

O mapa destaca que a zona sul de Marília possui áreas de exclusão social nas classes de declividade <5%, entre 5-12%, entre 12-30% e entre 30-47%, sobretudo, nas proximidades da escarpa do planalto.

Conforme De Biasi (1992) a classe de declividade 12-30%, é o limite máximo para a urbanização sem restrições. No entanto, a análise do mapa mostra que a expansão urbana tem ultrapassado esse limite, chegando até na classe entre 30-47%, considerada de risco para os moradores em função de sua baixa estabilidade.

Essa característica, quando confrontada com a fragilidade ambiental da área, gerada a partir das características geológicas, dos solos, do relevo e de suscetibilidade à erosão, indicam que a expansão urbana apresenta alta vulnerabilidade social nessas áreas, e que a população assentada encontra-se sob risco.

A vulnerabilidade social aumenta conforme as formas de expansão e ocupação urbanas são desenvolvidas, com ruas no sentido do declive, retirada da cobertura vegetal, impermeabilização do solo, concentração do escoamento superficial, movimentação das morfologias do relevo (corte/aterro) e às más condições das residências.

O cruzamento das características obtidas pelo mapa com o Mapa da Lei do Zoneamento e Uso do solo, de 2015, mostra também que a faixa próxima à escarpa do planalto é zona residencial de interesse social. No entanto, considera-se que o interesse social deve ser organizado, de modo a não apresentar risco a deslizamentos e desmoronamentos e, principalmente, risco à vida da população.



Figura 5. Aspectos do condomínio fechado, onde destacam-se arruamentos perpendiculares ao sentido da vertente, área de recomposição de espécies arbóreas e muro de separação da alta e média vertente, separando da escarpa do planalto.



Figura 6. Aspectos da estrutura de condomínio residencial fechado.

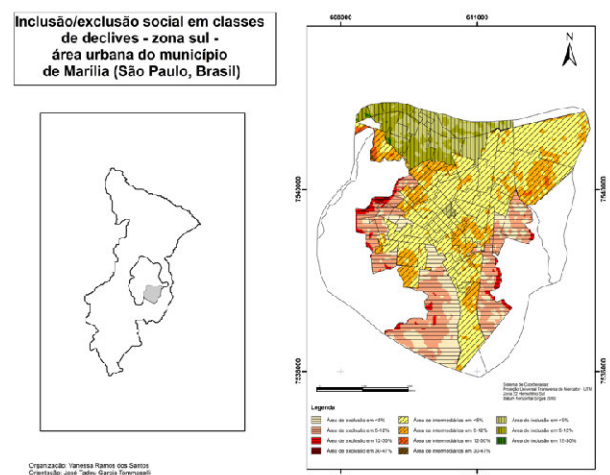


Figura 7. Mapa de inclusão/exclusão social em classes de declives na zona sul da área urbana de Marília (São Paulo, Brasil).

Os trabalhos de campo na zona sul foram realizados em áreas próximas à escarpa do planalto, após serem identificados no mapa de inclusão e exclusão social em classes de declive e previamente nas imagens de satélites e fotografias aéreas.

As Figuras 8 e 9 destacam as características da zona sul da área urbana do município de Marília, em que é possível observar características das moradias, os arruamentos com solo exposto, favorecendo a concentração e escoamento superficial de água e esgoto. Também é possível verificar a presença de detritos nas ruas.



Figura 8. Aspectos das moradias e da declividade (linha vermelha), com destaque para exposição do solo.



Figura 9. Aspectos da zona sul, com destaque para arruamento no sentido do declive (linha vermelha); destaque também para as características do solo (aspecto arenoso), ausência de cobertura vegetal (gramíneas esparsas) e escoamento superficial do esgoto.

#### IV. CONCLUSÕES

Com base no objetivo de verificar o uso de SIG para análises de impactos sobre morfologias do relevo, o presente estudo retratou que:

Nas zonas leste e sul de Marília - SP, a interação entre as formas de produção e ocupação do espaço urbano, por ocupação e por apropriação, e os processos erosivos em áreas naturalmente sensíveis, gera impactos diferenciados sobre as dinâmicas sociais dessas áreas. Esses impactos são negativos quando a população residente possui baixo poder aquisitivo (zona sul); e podem ser considerados positivos, quando busca-se perpetuar dinâmicas naturais, capitalizando-as e incorporando-as ao espaço urbano como 'recurso' à qualidade de vida urbana.

O uso de SIG foi essencial para manipulação de dados e geração das informações acerca dos impactos sobre as morfologias do relevo na área estudada uma vez que permitiu a extração dos dados de altitude, elaboração dos mapas de declividade e de

inclusão e exclusão social em classes de declive.

Os dados oriundos do sensor OLI do satélite Landsat 8 juntamente com as ortofotografias aéreas possibilitaram a identificação, a verificação e a obtenção de dados qualitativos e quantitativos do uso e da cobertura da terra na área estudada bem como da densidade e da característica das formas de produção do espaço urbano na zona sul e na zona leste do município de Marília.

Constata-se, portanto, que, em Marília, a relação entre a produção do espaço urbano das zonas leste e sul e as morfologias do relevo são caracterizadas pela mesma fragilidade ambiental, em função do mesmo contexto físico (características do solo e do relevo); porém, apresenta vulnerabilidade e riscos diferenciados de acordo com a população assentada, sendo a população da zona sul mais vulnerável aos impactos sobre as morfologias do relevo do que a residente na zona leste.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES ao CNPq pela concessão das bolsas de pesquisa de mestrado. Os autores agradecem também à EMLASA pela concessão de 15 ortofotografias da área de estudo.

#### REFERÊNCIAS

- DE BIASI, M. A carta clinográfica: os métodos de representação e sua confecção. Revista do Departamento de Geografia (FFLCH - USP), São Paulo, v. 6, 45-60, 1992.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Mapa pedológico do Estado de São Paulo. Brasília, DF: Embrapa/Ministério da Agricultura e do Abastecimento, 1999. 1 mapa, color. Escala 1:500.000.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC (ESRI). ArcGIS / ArcMap. Professional GIS for the desktop, release 10.3 Redlands, 2015.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Carta topográfica: folhas Alvinlândia (SF22-Z-A-III-3) e Marília (SF22-Z-A-III-1). Serviço Gráfico do IBGE, 1973. Escala 1:50.000.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT (São Paulo). Mapa Geológico do Estado de São Paulo. São Paulo, 1981. Escala: 1:500.000.
- KERTZMAN, F. F. et al. Mapa de erosão do estado de São Paulo. Revista do Instituto Geológico, Vol. especial. São Paulo, 1995, p. 31-36.
- MELAZZO, E. S. Marília: especialização industrial e diversificação do consumo. Trajetórias de uma cidade média. In: SPOSITO, M. E. B.; ELIAS, D.; SOARES, B. R. (Orgs.). Agentes econômicos e reestruturação urbana e regional: Chillán e Marília. 1 ed. São Paulo: Outras Expressões, 2012, p. 161-279.
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes antropizados. Revista do Departamento de Geografia. São Paulo: FFLCH/USP, n. 8, 1994.
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo. São Paulo: FFLCH-USP, 1997. Escala: 1:500.000.
- ROSS, J.L.S. Geomorfologia: ambiente e planejamento. 9 ed. São Paulo: Contexto, 2012.
- SANTOS, Vanessa Ramos dos. Análise temporal de impactos sobre morfologias do relevo nas zonas leste e sul da área urbana de Marília, São Paulo, Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, São Paulo, Brasil, 2017.

# Análisis de métodos para la cartografía de incendios forestales en el cantón Cuenca a partir de imágenes TERRA/AQUA MODIS

Cure López Lisseth<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Posgrados/  
Universidad del Azuay  
Cuenca/Azuay/Ecuador  
lichicl@hotmail.com

## RESUMEN

La presente investigación explora el potencial de la información satelital para completar y complementar la información disponible en las bases de datos oficiales sobre ocurrencia y localización de incendios forestales en Ecuador. Para ello se aborda un análisis del comportamiento espectral de las zonas quemadas en la región del Azuay y zonas aledañas, a partir de la información contenida en imágenes de resolución espacial baja y temporal alta adquiridas por el sensor MODIS TERRA y AQUA. Los resultados muestran que los productos MOD09A1 (es un compuesto de 16 días que combina información procedente de las plataformas TERRA y AQUA, cuenta con una corrección de la reflectividad en función de las condiciones de observación e iluminación teniendo en cuenta el factor de reflectancia bidireccional que considera la anisotropía (la energía reflejada no es la misma en todas las direcciones, dependiendo del ángulo de observación y de iluminación solar) de las diferentes coberturas del suelo y aplica una corrección para atenuar este efecto), presentan un mejor desempeño al momento de cartografiar áreas quemadas en imágenes recientes post-incendio al ofrecer una mayor separabilidad espectral con otras cubiertas de la imagen. Sin embargo, el producto MCD43A4 (es un compuesto de 16 días que combina información procedente de las plataformas TERRA y AQUA) parece funcionar mejor cuando las imágenes no son recientes. El periodo de estudio fue en el año 2012, año en el cual se presentaron incendios de gran extensión.

Palabras clave: **Área quemada, índices espectrales, incendios forestales, MODIS, teledetección.**

## ABSTRACT

*The present research explores the potential of satellite information to complete and complement the information available in the official databases on occurrence and location of forest fires in Ecuador. For this, an analysis of the spectral behavior of the burned areas in the Azuay region and surrounding areas is carried out, based on the information contained in low and high temporal spatial resolution images acquired by the MODIS TERRA and AQUA sensor. The results show that the products MOD09A1 (a compound of 16 days that combines information from the platforms TERRA and AQUA, has a correction of the reflectivity depending on the conditions of observation and lighting taking into account the factor of bi-directional reflectance that considers the anisotropy (the reflected energy*

is not the same in all directions, depending on the angle of observation and solar illumination) of the different soil coverages and applies a correction to attenuate this effect), present a better performance at the time of mapping Areas burned in recent post-fire images by offering greater spectral separability with other picture decks. However, the product MCD43A4 (is a compound of 16 days that combines information from the platforms TERRA and AQUA). Seems to work best when images are not recent. The study period was in 2012, the year in which fires of great extent occurred.

**Keywords:** *Burnt area, spectral indexes, forest fires, MODIS, Remote sensing.*

## I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial los incendios forestales constituyen una catástrofe natural de primera magnitud. Se trata de un fenómeno global que afecta a una gran variedad de ecosistemas en todo el planeta llegando a devastar cerca de 350 millones de hectáreas por año (FAO, 2009). En las últimas décadas, diversos estudios han evidenciado un aumento en la severidad de los incendios forestales y en la superficie afectada en muchas regiones del mundo como América del Norte, Siberia y en el norte de Asia, (Groot et al. 2012).

Entre los efectos adversos de los incendios forestales se encuentra su contribución a las emisiones de gases de efecto invernadero, generando de esta forma una relación estrecha entre el cambio climático y la incidencia de incendios. Se trata de una relación cíclica pues algunos estudios demuestran que el cambio climático provoca, a su vez, una prolongación de las temporadas de incendios forestales a nivel global (Groot et al. 2012). Todo ello evidencia la importancia de contar con información precisa, continua y consistente sobre la ocurrencia de este fenómeno a nivel global pero también, de forma más específica, a escala continental- regional.

Uno de los aspectos más importantes en la gestión de los incendios forestales es la cuantificación de la superficie afectada cada año. En las últimas décadas se han utilizado diferentes técnicas de percepción remota mediante imágenes satelitales con la finalidad de poder identificar, cuantificar y cartografiar las zonas afectadas por incendios forestales (Verdú & Salas 2010). Los cambios que generan los incendios en las cubiertas vegetales: reducción de clorofila y contenido de humedad, incremento de zonas de suelo descubierto, alteraciones del color, deposición de cenizas y carbón, etc.; afectan a su comportamiento espectral, lo que permite diferenciar las áreas quemadas de otros tipos de coberturas existentes en el territorio a partir de imágenes de satélite (Santis & Vaughan 2009).

Imágenes adquiridas desde diversas plataformas y sensores han sido utilizadas para cartografiar áreas quemadas de una forma más económica, accesible y con alta fiabilidad. Además, en el ámbito de los incendios, la información proporcionada por la teledetección ha sido utilizada para la detección temprana de focos activos (Vélez, 2012 en González et al., 2009)

La gran variedad de satélites existentes en el mercado han permitido abordar un buen número de proyectos para cartografiar áreas quemadas a diferentes resoluciones espaciales y temporales, mediante imágenes de resolución espacial baja y alta frecuencia temporal como NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation y TERRA-MODIS, habitualmente utilizados para la detección y cartografía de incendios a escalas continentales (Chuvieco et al., 2006). Otras imágenes, como las adquiridas por la familia de satélites Landsat, que tienen una resolución espacial media-alta, se han utilizado para cartografiar incendios a escalas regionales o locales (Verdú & Salas, 2010)

En el Ecuador no existe un levantamiento sistemático de información in-situ de las áreas afectadas por los incendios

forestales. La información generada es en base a un análisis visual llevado a cabo por las entidades de respuesta y que incluye la localización de un punto de referencia tomado con un GPS, así como la estimación del área y vegetación afectadas. No se han aplicado en Ecuador hasta el momento, técnicas de teledetección para cuantificar, cartografiar y realizar un seguimiento sistemático de la recurrencia de incendios forestales.

En el año 2008 el gobierno ecuatoriano mediante Decreto Ejecutivo 1046-A crea la Secretaría Técnica de Gestión de Riesgos, la misma que toma el nombre de Secretaría Nacional de Gestión de Riesgos el 18 de septiembre del 2009. Desde esta fecha hasta la actualidad es ésta la entidad encargada de coordinar acciones en respuesta a los diferentes riesgos naturales y a situaciones de emergencia en el país. A nivel de la provincia del Azuay la misma comienza a funcionar a partir del año 2011.

Precisamente en el año 2012, el Ecuador entró en estado de emergencia como consecuencia de la oleada de incendios forestales que afectaron al país. El 14 de septiembre de ese año, 8 de las 24 provincias del país se declararon en alerta naranja. Cerca de 28.000 ha. de bosque y pajonales fueron consumidos por el fuego, de las cuales 2.500 ha fueron pérdidas en la provincia del Azuay. La magnitud de los siniestros fue tal que se recibió ayuda de países como Brasil, Colombia y Venezuela que aportaron recursos en las labores de extinción. Éste sin duda ha sido uno de los años con mayor registro de incendios de las últimas décadas del Ecuador (SNR, 2013).

La Secretaría Nacional de Riesgos (SNR) dirección del Azuay, comenzó en el año 2012 a realizar un monitoreo de los de incendios forestales ocurridos en la provincia, generando una base de datos de siniestros que incluye un punto de ubicación georreferenciado, la fecha del siniestro, las hectáreas afectadas y el uso de suelo afectado. La georreferenciación de los incendios es de carácter aproximado ya que no se realiza un levantamiento in situ del polígono del área afectada, debido a la topografía donde generalmente suceden los mismos, ya que en su mayoría se dan en lugares de muy poca accesibilidad. Por la misma razón tampoco se ha logrado determinar con exactitud el tipo de vegetación afectada en cada siniestro (Base de Datos SNR, 2013.). En la Tabla I se relacionan los incendios forestales mayores a 10 ha que han sido registrados por la Secretaría Nacional de Riesgos para el año 2012.

**TABLA I.**  
INCENDIOS FORESTALES REGISTRADOS POR LA SECRETARÍA NACIONAL DE RIESGOS AÑO 2012

COORDENADAS		PARROQUIA	SECTOR	FECHA	HA. APROX.
X	Y				
722211	9689086	Chiquintad	Tixán	09/08	16
728853	9681614	Chaullabamba	Camino a Nulti	11/08	10
721520	9658396	Cumbe	Américas	22/08	32
673148	9674498	Chaucha	Pichilcay	03/09	1250
722428	9668438	Tarqui	El Calvario	05/09	20
677765	9695405	Molleturo	San Pedro de Yumate	14/09	250
712877	9683412	Sayausí	San Miguel de Putushi - Cruz Quilloloma	16/09	15
725583	9676038	El Valle	Vía a Santa Ana	17/09	10



713247	9662543	Nulti	Ucubamba	21/09	10
719937	9665925	Tarqui	Chilcachaparra	04/10	16

El objetivo de este estudio fue explorar el uso de información satelital para completar y complementar la información disponible en la base de datos de incendios de la SNR mediante la obtención de datos espaciales georreferenciados de las áreas quemadas y cubiertas vegetales afectadas. El propósito del trabajo era determinar la metodología que mejor se ajusta a las características del territorio ecuatoriano.

Para realizar la investigación se debe considerar que las imágenes a ser utilizadas van a definir el alcance de los resultados, debido a que algunas técnicas presentan restricciones derivadas de:

1. La resolución temporal de las imágenes. Resoluciones temporales medias o bajas pueden dificultar la discriminación espectral de las áreas quemadas debido a procesos de recuperación post-incendio que atenúan la señal o incluso impidan la observación del incendio como consecuencias de la cobertura de nubes.
2. La resolución espacial que definirá el tamaño mínimo de los incendios a ser identificados. Imágenes de resolución espacial media-alta permitirán identificar con mayor precisión incendios de menor tamaño. Sin embargo, este tipo de imágenes suelen presentar frecuencia temporal baja.
3. La resolución espectral, que aportará información más o menos relevante de cara a realizar una correcta caracterización e identificación del área quemadas respecto de otro tipo de cubiertas presente en el territorio afectado (García & Chuvieco, 2004 en Valenzuela et al., 2008)

En función de la información obtenida por las diferentes entidades en cuanto a incendios forestales, y el análisis de las imágenes satelitales existentes para la zona de estudio, se pudo constatar la necesidad de contar con imágenes de alta resolución temporal, debido a la frecuente cobertura de nubes existentes en la región que impedía el uso de imágenes de alta resolución espacial como LANDSAT 8. Por este motivo se optó por utilizar imágenes de menor resolución espacial pero mayor frecuencia temporal como las obtenidas por el sensor MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>) a bordo de las plataformas TERRA y AQUA. La resolución espacial máxima de este tipo de imágenes es de 250 m, siendo la más frecuente de 500 m lo que impide discriminar incendios de pequeño tamaño, por este motivo la investigación se centró en analizar incendios mayores a 100 ha. Aunque el número de incendios mayores de 100 ha. ocurridos en el cantón Cuenca en 2012 según las estadísticas oficiales es pequeño (Tabla I), consideramos que es suficiente para abordar el estudio metodológico que se propone en este trabajo.

Existe una gran variedad de técnicas que permiten cartografiar áreas quemadas a partir de teledetección. La selección de la técnica más apropiada, dependerá de la información disponible y de las características de la zona de estudio (tipos de cubiertas vegetales, tamaño y severidad de los incendios, etc.). Algunos trabajos han demostrado la eficacia del análisis visual para la identificación de áreas quemadas utilizando para ello diversas composiciones en color. Esta técnica se utiliza fundamentalmente sobre imágenes de resolución espacial media alta, tipo Landsat. En este caso, como ya hemos explicado, la ubicación geográfica del área de estudio determina una alta frecuencia de cobertura nubosa por lo que no fue posible utilizar este tipo de imágenes y, por tanto, se descartó el uso de análisis visual.

Entre las técnicas de análisis digital, los índices espectrales son los que más comúnmente se han utilizado para identificar o cartografiar incendios forestales, basándose en su contribución al realce de la señal espectral correspondiente al área quemada (carbón, cenizas o vegetación afectada) con respecto a otros tipos de cubierta natural o artificial (Chuvieco et al., 2006). Muchos de estos índices combinan información de las regiones espectrales del rojo (600 a 700 nm), e infrarrojo cercano (700 a 1300 nm), especialmente indicadas para analizar el estado de la vegetación. Se ha demostrado que las áreas quemadas presentan una mayor reflectividad con respecto a la vegetación no afectada en la región del visible, especialmente si existen depósitos de cenizas procedentes de la combustión. Sin embargo, la reflectividad de las áreas quemadas es menor que la de la vegetación en el infrarrojo cercano (NIR) debido al efecto absorbente del carbón. Al combinar varias bandas los índices espectrales tienden a minimizar efectos atmosféricos o relacionados con la influencia del suelo lo que también resulta de interés en la discriminación de áreas quemadas (Chuvieco, 2002 en Pavón & Rodríguez-Verdú, 2006)

La región espectral del infrarrojo medio de onda corta (SWIR) (1300 a 2500 nm) ha demostrado también gran interés para la cartografía de áreas quemadas. Diversos estudios han comprobado que en esta región espectral se produce un aumento de los valores de reflectividad tras un incendio, como consecuencia de la pérdida de agua en la materia vegetal. Teniendo en cuenta que los efectos atmosféricos son mucho menores que en otros rangos del espectro visible, resulta obvio el potencial del SWIR en la cartografía de incendios, sobre todo tras la proliferación de sensores que obtienen información en esta región del espectro (LANDSAT TM, ETM y OLI, NOAA-AVHRR, SPOT-Vegetation, TERRA-MODIS...) (Martín et al., 2002).

Las bandas del SWIR han sido implementadas en una nueva generación de índices espectrales para cartografiar áreas quemadas mejorando los resultados respecto al uso de índices basados en las regiones del rojo e infrarrojo cercano (Martín et al., 2002; Pereira, Sa et al., 1999; Rogan & Franklin, 2001 en Pavón & Rodríguez-Verdú 2006)

En este trabajo se ha realizado un análisis del comportamiento espectral de las zonas quemadas en la región del Azuay a partir de la información contenida en imágenes adquiridas por el sensor MODIS (bandas del visible, NIR y SWIR). Para ello se han utilizado datos procedentes de dos productos MODIS con distintos niveles de corrección radiométrica en los valores de reflectividad. Concretamente se utilizaron productos con y sin corrección del efecto de las condiciones de iluminación y observación (factor de reflectividad bidireccional (BRDF)) lo que nos permitió valorar la idoneidad de este tipo de correcciones para la cartografía de áreas quemadas. Adicionalmente, a partir de estas imágenes, se han calculado una serie de índices espectrales propuestos en la literatura para la cartografía de áreas quemadas. Finalmente se ha abordado un análisis de separabilidad espectral entre los valores de los índices y bandas registrados en píxeles correspondientes a áreas quemada identificadas en las imágenes respecto a los de otras cubiertas. El estudio se ha realizado para imágenes obtenidas inmediatamente después de la ocurrencia de incendios y también para imágenes adquiridas varios meses después del evento con el propósito de analizar la persistencia temporal de la señal espectral correspondiente al área quemada en la zona de estudio y poder determinar así, la fecha más idónea para la selección de imágenes satelitales de cara a un proceso operativo de cartografía sistemática de los incendios en la zona.

Con esta información ha sido posible, por tanto, identificar las bandas e índices potencialmente más eficaces para discriminar áreas quemadas en función de las características del área de estudio y de la información espectral disponible, analizando además el efecto temporal sobre la degradación de la señal procedente del área quemada.

## II. MÉTODO

### A. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

El área de estudio incluye una ventana de 221.760,63 km<sup>2</sup> definida por las coordenadas Noroeste: 625490, 9725253 y Sureste: 794717, 9596666; como se muestra en la Figura 1. Esta ventana está centrada en el cantón Cuenca, perteneciente a la provincia del Azuay, la misma que se encuentra ubicada al sur del Ecuador. El cantón Cuenca por su ubicación geográfica, topografía y tipo de cobertura vegetal presenta vulnerabilidad a la presencia de incendios forestales provocados en su mayoría por el ser humano con la finalidad de ampliar la frontera agropecuaria.

El cantón Cuenca presenta una cobertura vegetal de páramo que ocupa el 28% del territorio, siendo éste un ecosistema sensible a los incendios forestales. Otro tipo de cobertura vulnerable al fuego son los bosques de *Polylepis* y vegetación leñosa nativa que juntos cubren un 24% del territorio cantonal. Por tanto, el 52% del cantón es vulnerable a este tipo de siniestros (Plan de Ordenamiento Territorial del cantón Cuenca, 2011).

Como ya se indicó (Tabla I) durante los meses de agosto a octubre del año 2012 en el cantón Cuenca se vio afectado por una serie de incendios forestales, algunos de tamaño considerable que serán objeto de estudio de este trabajo.

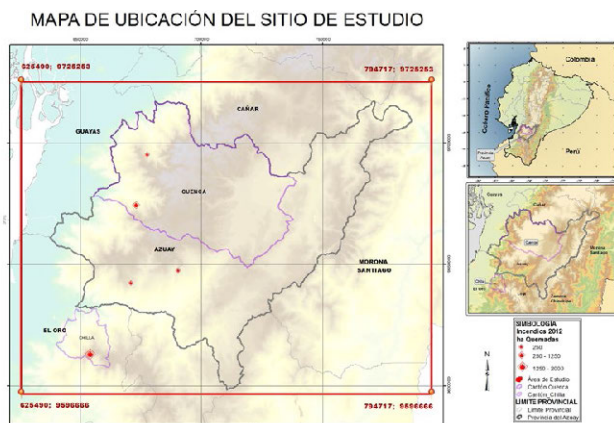


Figura 1. Ubicación del área de estudio

### B. DATOS

En el presente estudio se han utilizado imágenes satelitales obtenidas por el sensor MODIS (Moderate Resolution imaging Spectroradiometer), que se encuentra a bordo de las plataformas TERRA y AQUA. Este sensor adquiere datos de carácter global con una frecuencia diaria. Posee 36 bandas espectrales que ofrecen información en longitudes de onda que van desde 405 a 14385 nm (Visible, infrarrojo cercano, infrarrojo medio de onda corta e infrarrojo térmico) (Tabla II). Dos de estas bandas (banda 1 y 2 correspondientes a las regiones del rojo e infrarrojo cercano) cuentan con una resolución espacial de 250m, cinco bandas tienen resolución de 500m y las 29 bandas restantes de 1 Km. Este sensor permite detectar focos de calor, como los incendios forestales mediante la información captada en la región del infrarrojo térmico (TIR).

TABLA II. CARACTERÍSTICAS DEL SENSOR MODIS.

BANDA	RANGO ESPECTRAL (NM)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (M)
1	620-670	250
2	841-876	250
3	459-479	500
4	545-565	500
5	1230-1250	500
6	1628-1652	500
7	2105-2155	500
8	405-420	1000
9	438-493	1000
10	483-493	1000
11	526-536	1000
12	546-556	1000
13	662-672	1000
14	673-383	1000
15	743-753	1000
16	862-877	1000
17	890-920	1000
18	931-941	1000
19	915-965	1000
20	3660-3840	1000
21	3929-3989	1000
22	3929-3989	1000
23	4020-4080	1000
24	4433-4498	1000
25	4482-4529	1000
26	1360-1390	1000
27	6535-6895	1000
28	7175-7475	1000
29	8400-8700	1000
30	9580-9880	1000
31	10780-11280	1000
32	11770-12270	1000
33	13185-13485	1000
34	13485-13785	1000
35	13785-14085	1000
36	14085-14385	1000

Además de las imágenes originales, el organismo que se encarga de la adquisición y distribución de los datos a nivel global (Servicio Geológico de los Estados Unidos, USGS, USA) genera una gran cantidad de productos derivados del sensor MODIS que han sido diseñados para analizar distintas características de la cubierta terrestre, los océanos y la atmósfera. En este trabajo se han utilizado concretamente los productos MD09A1 y MCD43A4. Sus principales características se describen en la Tabla III. Todos los productos se han descargado de forma gratuita desde la plataforma de acceso a las imágenes del USGS ([www.glovis.usgs.gov](http://www.glovis.usgs.gov)).

El producto MOD09A1, ofrece información de la reflectividad captada por el sensor en 7 bandas que recogen datos espectrales en las regiones del visible, infrarrojo cercano e infrarrojo medio de onda corta (459 a 2155 nm). Se trata de un producto compuesto temporalmente con información adquirida durante un período de ocho días. La imagen resultante toma para cada píxel, las mejores observaciones (menor contaminación por nubes, mejor calidad radiométrica y geométrica, etc.) durante este período, lo que permite disminuir la cantidad de nubes y otros posibles problemas de adquisición en la imagen (García-Mora & Mas, 2011)

El producto MCD43A4, es un compuesto de 16 días que combina información procedente de las plataformas TERRA y AQUA. Tiene las mismas bandas que el producto MOD09A1

pero cuenta con una corrección de la reflectividad en función de las condiciones de observación e iluminación teniendo en cuenta el factor de reflectancia bidireccional que considera la anisotropía (la energía reflejada no es la misma en todas las direcciones, dependiendo del ángulo de observación y de iluminación solar) de las diferentes coberturas del suelo y aplica una corrección para atenuar este efecto. Este tipo de corrección simula una observación nadir para todos los píxeles de la imagen lo cual permite, en principio, una comparación más adecuada entre píxeles de la misma imagen y también entre imágenes adquiridas en distintas fechas. Al ser un producto combinado de dos satélites permite disminuir errores por nubes, sombras, etc. En el estudio se ha utilizado este producto para realizar una comparación con el producto MOD09A1 (García-Mora & Mas, 2011).

En este trabajo los productos MOD09A1 y MCD43A4 se utilizaron para analizar el comportamiento espectral de las áreas quemadas en la zona de interés mediante el análisis de las bandas originales de la imagen y los índices espectrales que se calcularon a partir de ellas.

**TABLA III.**  
CARACTERÍSTICAS DE PRODUCTOS MODIS UTILIZADOS EN ESTE ESTUDIO

PRODUCTOS	MOD09A1	MCD43A4
Plataforma	TERRA	Combinado TERRA/AQUA
Resolución Temporal	8 Días	16 Días
Información Espectral	Reflectividad bandas 1 -7	Reflectividad bandas 1-7 Corregida del BRDF
Resolución Espacial	500 m	500 m

Para seleccionar las imágenes que se utilizaron en el presente trabajo se consideró la cercanía a las fechas de los incendios registrada por la Secretaría Nacional de Riesgos (Tabla I). De igual manera se escogieron imágenes post-incendios (más y menos recientes), evitando las que tenían una alta cobertura de nubes. Las imágenes pre-seleccionadas y finalmente utilizadas en este estudio aparecen relacionadas en la Tabla IV y Figura 2.

**TABLA IV.**  
PRODUCTOS E IMÁGENES MODIS UTILIZADAS EN EL TRABAJO

PRODUCTO MODIS	IMAGEN	DÍA JULIANO	FECHA INICIAL	FECHA FINAL	INCENDIOS REGISTRADOS POR SNR	ÁREA (HA)	RESOLUCIÓN ESPACIAL (M)
MCD43A4	MCD43A4.A2012249.h10v09.005.2012270132613	249	05-sep-12	21-sep-12	03-sep-12	1250	500
					06-sep-12	2000	
	MCD43A4.A2012329.h10v09.005.2012346153255	329	24-nov-12	09-dic-12	03-sep-12	1250	
					06-sep-12	2000	
MOD09A1	MOD09A1.A2012249.h10v09.005.2012258065321	249	05-sep-12	13-sep-12	03-sep-12	1250	500
					06-sep-12	2000	
	MOD09A1.A2012329.h10v09.005.2012340002622	329	24-nov-12	01-dic-12	03-sep-12	1250	
					06-sep-12	2000	

**C. PRE - PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES**

Los productos MODIS son distribuidos por el USGS en mosaicos (tiles) de 10x10 ° en proyección sinusoidal, con una resolución radiométrica de 16 bits. Los valores de reflectividad de las bandas originales están escalados entre 0 y 10.000. Gracias a la herramienta MCTK conversión Toolkit, una extensión del software ENVI que está disponible libremente en: <https://github.com/dawwhite/MCTK>, hemos re proyectado las imágenes al sis-

tema UTM, WGS84 zona 17 sur y re-escalado los valores a 8 bits (valores de reflectividad de 0 a 1) para poder calcular los índices espectrales. Además, se recortaron las imágenes al área de estudio con el fin de trabajar con la ventana definida en la Figura 1 correspondiente a la provincia del Azuay y sus zonas aledañas.

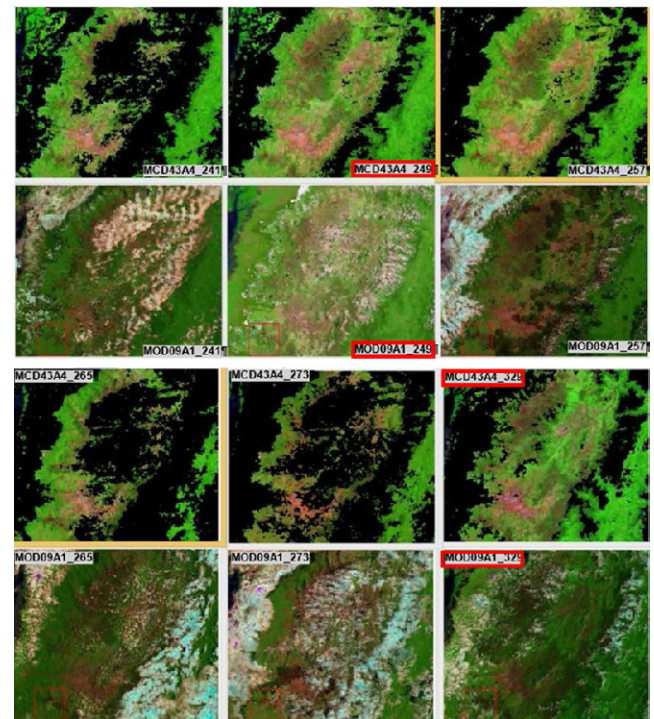


Figura 2. Serie temporal de productos de reflectividad (MOD09A1 y MCD43A4) pre-seleccionadas en este estudio.

Las fechas finalmente utilizadas aparecen remarcadas en rojo. Composición en color RGB de las bandas 721 (Figura 2). En el producto MCD43A4 los píxeles con calidad insuficiente para aplicar la corrección del BRDF (nubes) aparecen con valor 0 (negro). En el producto MOD09A1 los píxeles con todos blancos-azulados corresponden a cobertura de nubes.

**D. CÁLCULO DE ÍNDICES ESPECTRALES.**

En este trabajo se han calculado seis índices espectrales que se han seleccionado entre los habitualmente utilizados en la literatura para la cartografía de áreas quemadas a partir de imágenes de satélite. El objetivo fue comprobar cuál de ellos permite una mejor discriminación entre áreas quemadas y otras cubiertas en la zona de estudio en función de sus características específicas (tipo y tamaño de incendios, características de las cubiertas vegetales, etc.). Todos los índices se han calculado a partir de los productos MOD09A1 Y MCD43A4 con el propósito de comparar los resultados entre índices calculados con valores de reflectividad corregidos y no corregidos del efecto de reflectividad bidireccional. Los índices calculados son:

1) **NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)**

Se calcula como la diferencia normalizada de las bandas del rojo y del infrarrojo cercano ecuación [1]:

$$NDVI = \frac{IRC-C}{IRC+C} \tag{1}$$

Su rango varía de -1 a 1 con valores próximos a 1 para zonas con vegetaciones vigorosas y próximas a 0 para zonas desprovistas de vegetación, como es el caso de las zonas quemadas.

A pesar que este índice se ha utilizado para análisis multitemporales con la finalidad de cartografiar áreas quemadas, se ha demostrado que no es el más idóneo para este fin en relación a otros índices desarrollados para este propósito debido, entre otros factores, a que está muy afectado por la influencia del suelo (Chuvieco et al., 2002; Pereira, 1999; Stroppiana al., 2002; Trigg & Flasse, 2001 en Saldivia & Salinero 2007), sin embargo con motivos de corroborar esta información fue aplicado en este trabajo.

$$IAQ_i = 1 / ((\rho_{c_r} - \rho_{i,r})^2 + (\rho_{c_m} - \rho_{i,m})^2) \quad (2)$$

El índice combina información de las regiones del rojo e infrarrojo cercano sienta los puntos de convergencia de 0,1 y 0,6 respectivamente. Estos puntos representan la reflectividad esperada en una zona recientemente quemada con un grado de severidad alto (combustión completa o casi completa de la vegetación y presencia de carbón y cenizas) lo que ayuda a enfatizar la separabilidad espectral de las zonas quemadas respecto a otras cubiertas vegetales y no vegetales (suelos, agua, etc.) (Martín & Chuvieco, 1998 en Heredia Laclaustra et al., 2003).

### 3) BAIM (Burned Area Index MODIS)

Es una variación del IAQ, donde la banda del rojo se sustituye por la del infrarrojo medio de onda corta (SWIR) menos influenciada por los efectos atmosféricos (Martín et al., 2005 en Chuvieco et al. 2006). En este trabajo se calcularon dos versiones del BAIM que proponen distintos valores de convergencia para la banda del SWIR BAIM1  $P_{cswir} = 0,2$ ;  $P_{cswir} = 0,04$  y BAIM2  $P_{cswir} = 0,2$ ;  $P_{cswir} = 0,08$ . El sensor MODIS, presenta tres bandas del SWIR, las bandas 5, 6 y 7. Para este estudio se utilizó la banda 7, debido al bandeado existente en la banda 5 para los productos con datos de la plataforma TERRA y la banda 6 presenta bandeado para los productos provenientes de la plataforma AQUA, como lo muestra la ecuación [3]

$$BAI = \frac{1}{(P_{cswir} - \rho_{swir})^2 + (P_{cnir} - \rho_{nir})^2} \quad (3)$$

### 4) GEMI (Global Environmental Monitoring Index)

$$GEMI = \eta(1 - 0.25\eta) - \left[ \frac{\rho_{RED} - 0.125}{1 - \rho_{RED}} \right] \quad (4)$$

Fue definido como una alternativa al NDVI, se encuentra menos afectado por el suelo y las condiciones atmosféricas. Trabajos anteriores han demostrado que resulta más apropiado para la cartografía de áreas quemadas que el NDVI (Martín & Chuvieco 1998 en Pavón & Rodríguez-Verdú, 2006) (Ecuación [4])

Dónde (Ecuación [5]):

$$\eta = \frac{2 \cdot (\rho_{NIR}^2 - \rho_{RED}^2) + 1.5\rho_{NIR} + 0.5\rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED} + 0.5} \quad (5)$$

### 5) NBR (Normalized Burn Ratio)

Presenta la misma formulación del NDVI pero utiliza las banda del infrarrojo próximo (0,76-0,9  $\mu\text{m}$ )(banda2) e infrarrojo medio de onda corta (2,08-2,35  $\mu\text{m}$ ) (banda 7). Fue diseñado originalmente para ser utilizado a partir de imágenes Landsat (Key & Benson, 2005) (Ecuación [6]):

$$NBR = \frac{\rho_{IRC} - \rho_{SWIR}}{\rho_{IRC} + \rho_{SWIR}} \quad (6)$$

Diversos trabajos han demostrado que la incorporación de la banda del SWIR mejora considerablemente la distinción entre áreas quemadas y no quemadas con respecto al NDVI.

### E. CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LAS ÁREAS QUEMADAS

Con el propósito de analizar el comportamiento espectral de las áreas quemadas y las principales cubiertas presentes en la zona de estudio se identificaron píxeles representativos de cada una de estas cubiertas en las imágenes/productos analizados y se extrajeron, para esos píxeles, los valores de cada banda original (bandas 1 a 7) y de cada uno de los índices calculados.

Los píxeles representativos de cada cubierta o regiones de interés (ROIs), como se los denomina en el programa ENVI utilizado en el análisis, fueron localizados visualmente sobre composiciones en color de las imágenes. En el caso de los píxeles correspondientes a áreas quemadas, éstos se identificaron sobre dos grandes incendios ocurridos en la zona de Chaucha (Cuenca - Azuay) y Chilla (Chilla - El Oro). Para la ubicación de las áreas representativas de las cubiertas de ocupación de suelo se utilizó como apoyo la cartografía de uso de suelo generada por el Municipio de Cuenca para el Plan de Ordenamiento Territorial del cantón, año 2010. Además de las áreas quemadas se analizaron un total de 5 cubiertas de usos, 3 correspondientes a vegetación natural (páramo, bosque y pastizal), 1 cubierta que representa las zonas de cultivo y otra a las zonas urbanas. Se incorporó además una categoría de cubierta nubosa por ser ésta muy frecuente en la zona de estudio. Se intentó que los ROI de cada cubierta incluyeran zonas suficientemente homogéneas y representativas lo que, en algunos casos, condicionó el número de píxeles identificados en cada categoría. La Figura 3 y Tabla V muestran las cubiertas analizadas y la localización de los ROIs identificados para cada una de ellas.

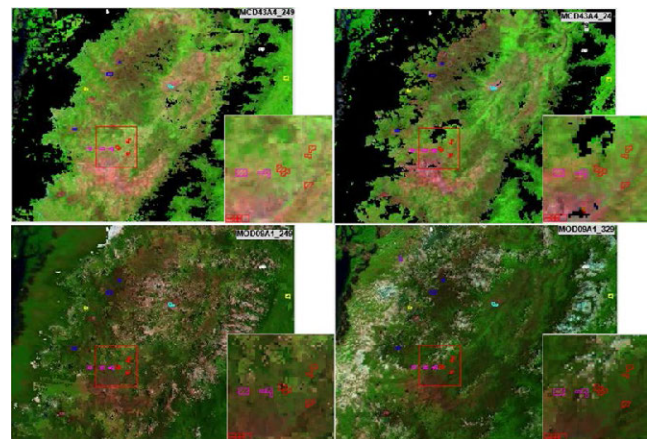


Figura.3 Localización de los ROIs identificados para cada cubierta.

Incluyen los píxeles cuyos valores serán utilizados en el análisis de caracterización y separabilidad espectral. En las ventanas de zoom se observan los ROIs de las cubiertas de cultivos y pastizal

Cabe mencionar que la localización de algunos ROIs tuvo que adaptarse a cada imagen para evitar incluir píxeles contaminados por nubes o sombras de nubes dado que su posición varía en las distintas fechas analizadas.

**TABLA V.**

TIPOS DE CUBIERTA IDENTIFICADOS PARA EL ANÁLISIS DE CARACTERIZACIÓN/SEPARABILIDAD ESPECTRAL Y NÚMERO DE PÍXELES TOMADOS POR MUESTRA

CUBIERTAS	Nº DE PÍXELES	COLOR EN LA FIGURA 3
Nubes	17	Blanco
Área quemada	14	Café
Páramo	37	Azul
Bosque	36	Amarillo
Cultivos	36	Magenta
Área urbana	14	Cardenillo
Pastizal	37	Rojo

Una vez realizadas la extracción de los píxeles correspondientes a cada cubierta para los productos MODIS analizados en este trabajo se calcularon los valores de media y desviación estándar para cada cubierta y banda/índice, se construyeron gráficos de separabilidad que muestran el valor de media  $\pm$  1 desviación típica para cada banda/índice y tipo de cubierta. Este tipo de gráficos permite analizar, de forma cualitativa, el solapamiento espectral entre categorías en las distintas bandas e índices analizados considerando, no sólo el valor promedio, sino también la dispersión de los valores espectrales que caracterizan a cada cubierta, es decir, su variabilidad interna.

#### F. ANÁLISIS DE SEPARABILIDAD ESPECTRAL.

Aunque los gráficos de separabilidad espectral antes mencionados permiten una primera valoración cualitativa de la capacidad de bandas e índices para discriminar entre áreas quemadas y otras cubiertas de la imagen, en este trabajo se realizó, además, un análisis cuantitativo para poder establecer de forma más precisa qué banda o índice espectral discrimina de mejor forma el área quemada del resto de cubiertas analizadas. Para ello calculamos un índice M de separabilidad propuesto por Pereira (Ecuación [7]) (1999 en Pavón & Rodríguez-Verdú, 2006).

Donde:

$$M = \frac{(\mu_c - \mu_q)}{(\sigma_c + \sigma_q)}$$

- $\mu_c$ = Es la media de cada una de las cobertura vegetales no quemadas.
- $\mu_q$ = Es la media de las áreas quemadas.
- $\sigma_c$ = Desviación estándar de los valores de las coberturas vegetales no quemadas
- $\sigma_q$ = Desviación estándar de las áreas quemadas

Valores de M superiores a 1, indican una buena separabilidad, mientras que los valores menores a 1 demuestran un solape espectral de los histogramas de las diferentes coberturas con respecto al área quemada, es decir, no existe una buena discriminación de las mismas. Los valores de separabilidad nos indicarán qué bandas o índices son más adecuados para la cartografía de incendios forestales con imágenes MODIS en Ecuador.

### III. RESULTADOS

#### A. CARACTERIZACIÓN ESPECTRAL DE LAS ÁREAS QUEMADAS

Las Figuras 4 y 5 muestran los gráficos de caracterización espectral elaborados a partir de la información correspondiente a las bandas originales de los productos MODIS analizados.

En estas figuras las líneas horizontales representan los valores medios de reflectividad de los píxeles identificados para cada categoría; y las barras verticales la dispersión respecto a ese valor medio ( $\pm$  1 desviación típica). Líneas horizontales muy próximas o solapadas indicarán un comportamiento espectral muy similar de las cubiertas en las correspondientes

bandas/índices espectrales. Por el contrario, líneas muy separadas indicarán una buena separabilidad espectral entre las cubiertas. Las barras verticales por su parte, permiten analizar posibles confusiones considerando la variabilidad espectral interna de cada cubierta. Es posible que algunas cubiertas presenten valores de media distintos (por tanto espectralmente separables) pero que esta separabilidad no sea posible si consideramos su variabilidad interna (desviación típica). En principio cuanto mayor sea ésta variabilidad, mayor será el riesgo de confusión con otras cubiertas.

Para una correcta visualización de los datos en los gráficos generados los valores originales de los índices espectrales NDVI, NBR y GEMI han sido re-escalados (x 100) para que alcancen un rango similar a los índices IAQ, BAIM1 y BAIM2.

En la Figura 4 se observa que las cubiertas vegetales (bosque, pastizal, cultivos y páramo) presentan un comportamiento espectral típico, con valores de reflectividad bajos en las bandas 3, 4 y 1 (visible) debido al efecto absorbente de los pigmentos foliares; altos en la banda 2 (infrarrojo cercano) debido a la reflexión de la radiación solar que producen en esta región las cavidades de aire internas de las hojas sanas y vigorosas; y medios en las bandas 5, 6 y 7 (infrarrojo medio de onda corta), relacionados con el contenido de agua de las plantas. El área quemada presenta los valores más bajos en todas las bandas debido en parte al efecto absorbente de los residuos de la combustión (carbón y cenizas). Se observan solapes evidentes entre áreas quemadas y cubiertas vegetales en las bandas del visible y también, aunque en menor medida, en la banda 7. Sin embargo la separabilidad es mayor en las bandas 2, 5 y 6 (NIR y SWIR). Se observa claramente cómo la confusión con otras cubiertas, especialmente con el páramo, aumenta en la imagen de noviembre (DOY 329), adquirida varios meses después de los incendios analizados, debido a las transformaciones que se producen en las áreas quemadas con el paso del tiempo y que incluyen habitualmente la desaparición de los materiales de combustión (carbón y cenizas) por efecto del viento y la lluvia; y la regeneración de la vegetación. Estas transformaciones hacen que la respuesta espectral de las áreas quemadas sea menos nítida y se asemeje más a otras cubiertas presentes en la imagen. Esto confirma la conveniencia de utilizar imágenes post-incendio adquiridas en fechas próximas a la ocurrencia de los incendios para realizar una adecuada discriminación y delimitación de las zonas afectadas. Esto sólo es posible en la zona de estudio si se utilizan imágenes procedentes de sensores de alta o muy alta resolución temporal tipo MODIS. En la misma Figura 4 vemos que tanto la categoría área urbana como la categoría nubes presentan un comportamiento espectral bastante diferenciado respecto a las áreas quemadas. Las nubes presentan valores de reflectividad muy altos y, aunque su variabilidad interna también es muy elevada, no existe riesgo de confusión con las áreas quemadas. Sin embargo, las sombras de nubes, no analizadas en este estudio, si han sido identificadas por diversos autores como áreas problemáticas de cara a la cartografía de incendios, pues presentan un comportamiento espectral muy similar a las zonas recientemente quemadas, especialmente en la región del visible. Esto mismo ocurre con las zonas de agua que presentan típicamente valores muy bajos de reflectividad en todo el espectro óptico por lo que el riesgo de confusión con zonas recientemente quemadas también es importante. En el caso de las láminas de agua el problema de la confusión espectral no es tan grave ya que, al ser zonas con una ubicación estable, pueden utilizarse máscaras, basadas por ejemplo en información obtenida de mapas de usos, para eliminarlas previamente del análisis y evitar así confusiones espectrales.

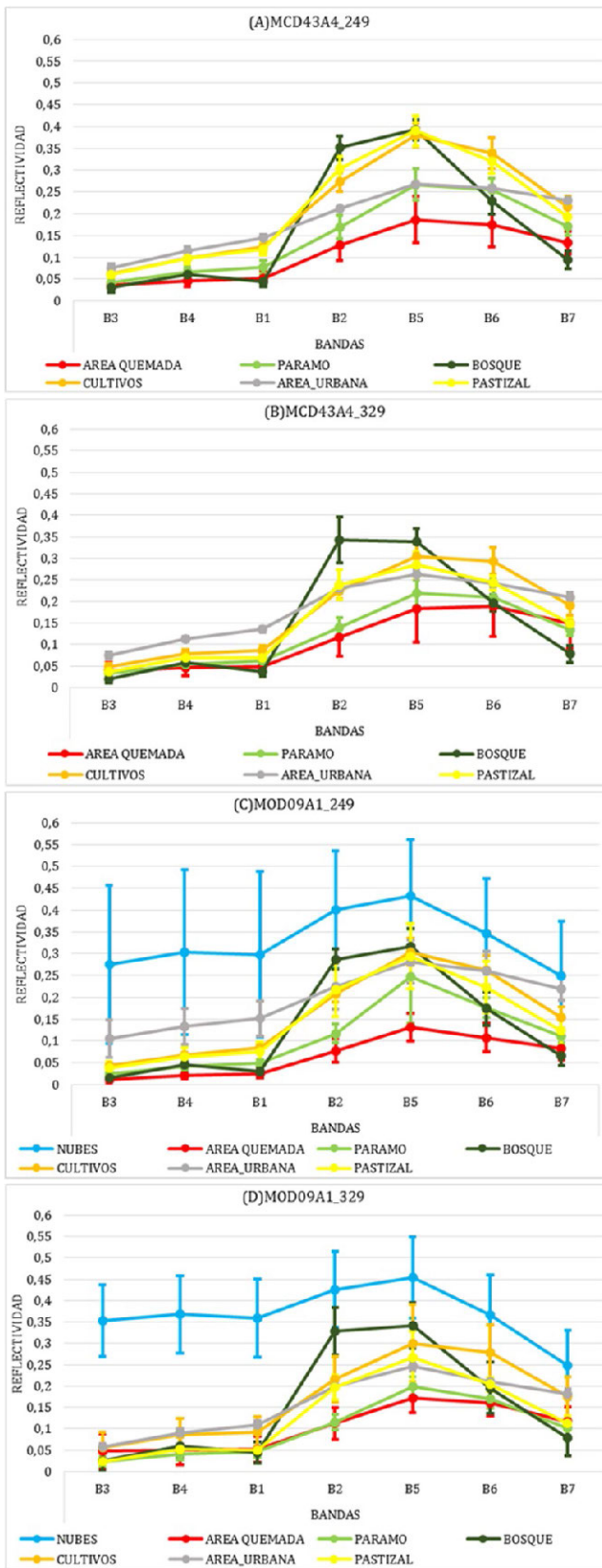


Figura.4 Caracterización espectral de las cubiertas analizadas para las 7 bandas originales.

- A) producto MCD43A4 de septiembre 2012 (día 249),
- B) producto MCD43A4 de noviembre 2012 (día 329),
- C) producto MOD09A1 de septiembre 2012 (día 249),
- D) producto MOD09A1 de noviembre 2012 (día 329)

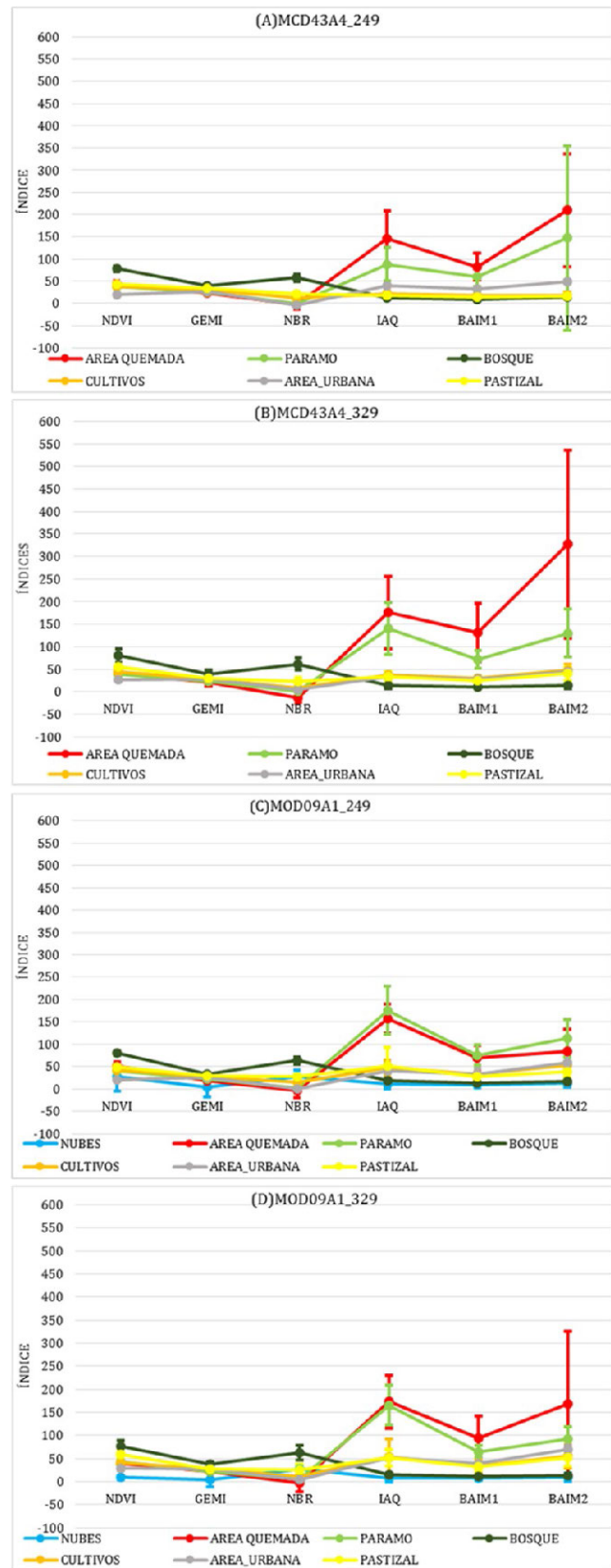


Figura.5 Caracterización espectral de las cubiertas analizadas para los 6 índices espectrales.

- A) producto MCD43A4 de septiembre 2012 (día 249),
- B) producto MCD43A4 de noviembre 2012 (día 329),
- C) producto MOD09A1 de septiembre 2012 (día 249),
- D) producto MOD09A1 de noviembre 2012 (día 329)

A simple vista, el comportamiento espectral de las distintas cubiertas es muy similar en los productos con y sin corrección del BRDF (MCD43A4 y MOD09A1 respectivamente). Sin embargo, parece observarse una mayor variabilidad interna de las cubiertas en el caso del producto MCD43A4, que podría dificultar la separabilidad espectral del área quemada respecto a otras cubiertas. Esto lo podremos confirmar a partir de análisis cuantitativo realizado con el índice de separabilidad que se comenta en la siguiente sección.

Como podemos observar en la Figura 5 el comportamiento de los índices estudiados, para las diferentes cubiertas vegetales, permiten identificar en una primera aproximación cualitativa, cuál de los seis índices presenta una mejor discriminación entre áreas quemadas y otras cubiertas. Para el producto MODIS MCD43A4 (Figura 5 A y B), el índice NDVI, permite una buena discriminación de las coberturas vegetales más vigorosas, en este caso el bosque, el cual no presenta solapamientos con respecto a otras coberturas, de igual manera sucede con el área urbana, debido a sus características espectrales, sin embargo las coberturas de páramo y cultivos no son bien discriminadas con este índice. Pudimos observar que los valores generados por este índice presentan solapamiento entre las coberturas cultivos, páramo, pastizales y el área quemada, lo cual concluye que este índice no discrimina el área quemada objeto de este estudio lo que corrobora lo ya mencionado en varios estudios (Pereira 1999). Lo mismo ocurre con el índice GEMI, con valores menores pero similares existiendo solapamiento, en especial con las cubiertas de cultivos, pastizales y área urbana. El bosque presenta puntos de confusión con las cubiertas mencionadas y, presenta de igual manera valores similares entre el área quemada y el páramo.

El índice NBR, presenta mejores resultados que los mencionados anteriormente, sin embargo la similitud en el comportamiento del páramo y el área quemada sigue presentándose como un problema para el estudio. Este índice sustituye la banda del rojo (banda 1) por la del infrarrojo medio de onda corta (banda 7) que, como vimos en la figura 4, presenta mejor separabilidad entre zonas quemadas y otras cubiertas. Sin embargo, la mayor separabilidad entre el páramo y el área quemada en la región del SWIR se observa en la banda 5 por lo que podría analizarse en futuros estudios la posibilidad de utilizar ésta en lugar de la banda 7, en la formulación del NBR.

Con respecto al producto MOD9A1, el comportamiento de los índices es similar al del producto con corrección del BRDF, no existe una variación notable, salvo que presenta una variabilidad interna menor, lo cual permitiría, en principio, una mejor separabilidad entre las cubiertas, esto considerando imágenes cercanas a la fecha de incendios.

Los índices IAQ, BAIM1 y BAIM2 presentan una buena separabilidad entre área quemada y otras cubiertas a excepción del páramo, que presenta valores similares a los de los incendios, especialmente en la imagen de septiembre. Una de las peculiaridades de estos índices es su alta variabilidad interna (elevada desviación típica) que influye negativamente en su capacidad de discriminación. Estos índices han sido creados para potencializar la presencia de carbón y cenizas en las bandas del infrarrojo medio de onda corta. Sin embargo, como se pudo observar en la Figura 4, de las tres bandas SWIR de MODIS (5, 6 y 7), esta última presenta la peor discriminación con respecto a las otras dos bandas. Aunque los autores que propusieron estos índices utilizaron la banda 7 con el propósito de, mejorar la discriminación con respecto a sombras y agua, consideramos que, en este caso, sería posible contemplar la utilización de la banda 5 (para productos MODIS que

provengan del sensor AQUA) o la banda 6 (para productos del sensor TERRA), esto debido al bandeado ya explicado, para mejorar los resultados de estos índices.

La Figura 5B nos muestra que el producto MCD43A4, parece ofrecer una discriminación mayor de las diferentes cubiertas, en comparación con el producto MOD09A1 (Figura 5D) lo que indicaría que a este es más adecuado para la cartografía de incendios en la zona cuando no se cuenta con imágenes recientes respecto a la fecha del incendio.

Como veíamos en el caso de las bandas originales, también los índices permiten discriminar sin problema la cubierta nubosa respecto al área quemada debido a que ambas presentan un comportamiento espectral muy diferenciado.

## B. ANÁLISIS DE SEPARABILIDAD ESPECTRAL

En las Tablas. 6 y 7 se muestran los valores de separabilidad M obtenidos para cada cobertura y cada banda/índice en los dos productos y fechas analizados. En general, podemos decir que los valores de M mayores de 1 indican una buena separabilidad espectral, mientras que los valores menores de 1 representan una importante superposición de los histogramas de las dos clases que se comparan (en este caso áreas quemadas frente a otras cubiertas). En las tablas hemos resaltado en color verde la mayor separabilidad para cada cubierta y en el color rojo los valores más bajos de separabilidad.

Los valores de índice M obtenidos confirman los resultados cualitativos previamente comentados en los gráficos de separabilidad. En general, existe una buena separabilidad espectral entre las zonas quemadas y el resto de cubiertas de la imagen excepto para la cubierta páramo, que presenta los valores más bajos de M, en algunos casos inferiores a 1, especialmente en el producto MCD43A4. La separabilidad de esta cubierta se reduce considerablemente en la imagen de noviembre (DOY 329), donde el páramo presenta siempre valores de M inferiores a 1, es decir, no es espectralmente diferenciable de las áreas quemadas. Esto refuerza la necesidad de contar con imágenes recientes post-incendio para realizar una adecuada discriminación de las áreas quemadas. Esto es especialmente importante en la zona de estudio, donde las áreas de páramo son unas de las más sensibles a la ocurrencia de incendios.

Las otras dos cubiertas de vegetación natural consideradas en este estudio presentan valores de separabilidad aceptables, especialmente en las bandas 2 y 5 (NIR y SWIR) siendo, en general, más altos los valores de separabilidad para el bosque que para el pastizal. Los valores de separabilidad también disminuyen en la imagen de noviembre pero siguen manteniéndose por encima de 1 en la banda del NIR y en la mayor parte de los índices espectrales.

Los cultivos presentan valores de separabilidad similares a los del pastizal, mientras que las áreas urbanas ofrecen también valores de separabilidad altos, especialmente en la región del visible.

En la imagen MCD43A4 para la fecha de septiembre (DOY 249) la banda 2 (NIR) presenta la mejor separabilidad con respecto al área quemada para la mayor parte de las cubiertas analizadas, salvo en el caso del páramo y el área urbana. Para la imagen del mes de noviembre del producto MCD43A4, sin embargo, en general el índice NBR, presenta el valor más alto de separabilidad. Esto indica que los índices espectrales ayudan a realzar la respuesta espectral de las áreas quemadas cuando ésta resulta ya más débil debido al tiempo transcurrido desde el inicio del incendio hasta la adquisición de la imagen.

Esto debe tenerse en cuenta de cara a un posible uso operativo de las imágenes MODIS para la cartografía de incendios en el Ecuador

El análisis del producto MOD09A1, muestra que, en general, los índices espectrales presentan mejor separabilidad que las bandas originales, especialmente en el caso del IAQ. Estos resultados no coinciden con los de otros autores, donde los índices basados en el NIR-SWIR mejoran los resultados respecto a los que utilizan ROJO-NIR, como el IAQ. Esto puede deberse a que, en la zona de estudio, la banda 7, utilizada en el cálculo de los índices NIR-SWIR (NBR, BAIM1 y BAIM2) presentan valores de separabilidad relativamente bajos comparados con otras bandas del SWIR como la banda 5 o la 6. Esto sugiere la posibilidad de proponer, en trabajos futuros, una modificación de estos índices basada en el uso de estas bandas en lugar de la banda 7. No obstante debe tenerse en cuenta, como ya hemos comentado, que la banda 5 presenta un problema de bandeo en el sensor MODIS-TERRA y la banda 6 en el sensor MODIS-AQUA por lo que habrá de utilizarse una u otra en función del origen de los datos utilizados. También es interesante constatar que el BAIM1 ofrece siempre mejores valores de separabilidad que el BAIM2 por lo que podemos deducir que el punto de convergencia del NIR= 0,04 se adapta mejor a las características de la zona de estudio. Esto sugiere también la posibilidad de adaptar los puntos de convergencia de este índice para realizar la cartografía de áreas quemadas en Ecua-

dor. Para ello se podría analizar una serie más larga de datos, incluyendo otros incendios que permitan confirmar cuál es el comportamiento espectral tipo de los incendios en el Ecuador

Si comparamos los valores de separabilidad promedio obtenidos para los productos MCD43A4 y MOD09A1 vemos que los resultados son muy similares. Para el producto MOD09A1 se calculó el valor medio para todas las cubiertas, y también sin considerar la cobertura de nubes para hacerlo más comparable a la media obtenida para el producto MCD43A4. De la comparación de estos valores observamos que la separabilidad media es ligeramente superior en el producto MOD09A1 en la imagen de septiembre pero es inferior en la de noviembre. Esto podría indicar que la corrección del BRDF aplicada al producto MCD43A4 realza mejor la separabilidad espectral entre el área quemada y otras cubiertas cuando la señal post-incendio es menos nítida debido al tiempo transcurrido desde la ocurrencia del incendio a la adquisición de la imagen.

La Figura 6 muestra de forma gráfica los valores de separabilidad de las Tabla. 6 y Tabla. 7, en la cual podemos comparar más fácilmente el comportamiento global de cada banda/índice, con respecto a cada cubierta, producto y fecha.

Resulta evidente que los valores de separabilidad disminuyen notablemente conforme nos alejamos de la fecha del incendio, esto debido a la pérdida de contenido de carbón y ceniza en el área quemada.

TABLA VI.  
VALORES DE SEPARABILIDAD M CALCULADOS PARA LAS IMÁGENES MCD43A4

COBERTURA VEGETAL		NUBES		PARAMO		BOSQUE		CULTIVOS	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	1,37	2,51	1,39	0,14	0,27	0,15	2,99	0,58
	B2	2	2,5	0,79	0,06	4,13	2,34	2,8	1,14
	B3	1,41	2,44	1,16	0,46	0,3	0,36	2,94	0,1
	B4	1,44	2,54	1,39	0,22	1,45	0,17	3,19	0,48
	B5	1,87	2,14	0,83	0,42	2,54	1,91	2,75	1,02
	B6	1,51	1,65	1,25	0,15	0,93	0,38	2,29	1,21
	B7	1,09	1,15	0,68	0,33	0,36	0,52	1,39	0,72
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	0,6	1,91	0,75	0,21	2,19	1,67	0,77	0,13
	GEMI	0,58	0,96	1,12	0,07	3,5	2,05	2,98	1,17
	NBR	1,05	1,02	0,19	0,31	2,8	1,81	0,85	0,51
	IAQ	3,24	2,51	0,21	0,07	3,9	2,6	2,22	1,24
	BAIM1	1,72	1,63	0,13	0,49	1,97	1,67	1,14	0,99
	BAIM2	1,19	0,97	0,33	0,42	1,31	0,98	0,53	0,63
COBERTURA VEGETAL		ÁREA URBANA		PASTIZAL		MEDIA		MEDIA SIN NUBES	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	2,54	1,37	1,58	0,05	1,69	0,8	1,76	0,46
	B2	1,86	2	1,58	1,3	2,19	1,56	2,23	1,37
	B3	1,93	0,19	1,21	0,5	1,5	0,68	1,52	0,32
	B4	2,27	0,91	1,55	0,05	1,88	0,73	1,97	0,37
	B5	1,84	1,54	1,53	0,99	1,89	1,34	1,9	1,17
	B6	1,98	1,24	1,26	0,9	1,54	0,92	1,54	0,78
	B7	2,6	1,37	0,68	0,07	1,14	0,7	1,14	0,6
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	2,68	0,62	0,21	1,06	1,2	0,93	1,32	0,74
	GEMI	2,3	1,88	1,61	1,19	2,01	1,22	2,3	1,27
	NBR	0,17	0,28	1,42	0,91	1,08	0,81	1,09	0,76
	IAQ	2,37	1,96	1,43	1,63	2,23	1,67	2,02	1,5
	BAIM1	0,91	1,08	1,16	1,06	1,17	1,15	1,06	1,06
	BAIM2	0,35	0,61	0,73	0,67	0,74	0,71	0,65	0,66

TABLA VII.  
VALORES DE SEPARABILIDAD M CALCULADOS PARA LAS IMÁGENES MOD09A1

COBERTURA VEGETAL		PARAMO		BOSQUE		CULTIVOS	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	0,88	0,5	0,25	0,43	2,46	1,31
	B2	0,64	0,32	3,5	2,3	2,49	1,68
	B3	0,37	0,22	0,38	0,66	1,87	0,34
	B4	0,81	0,34	0,72	0,4	2,34	1,29
	B5	0,91	0,34	2,72	1,45	2,44	1,14
	B6	1,07	0,21	0,67	0,08	1,91	1,02
	B7	0,79	0,21	0,85	0,91	1,63	0,51
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	0,58	0,12	2,59	1,18	0,57	0,13
	GEMI	0,7	0,18	3,28	1,02	2,3	0,7
	NBR	0,13	0,91	3,27	3,31	1,03	1,32
	IAQ	0,6	0,26	2,15	1,89	1,91	1,57
	BAIM1	0,44	0,7	2,31	1,75	1,91	1,44
	BAIM2	0,18	0,76	1,5	1,46	1,42	1,27
COBERTURA VEGETAL		ÁREA URBANA		PASTIZAL		MEDIA	
IMAGEN		249	329	249	329	249	329
BANDAS	B1	3,85	3,58	2,22	0,82	1,93	1,33
	B2	1,98	1,99	2,68	1,52	2,26	1,56
	B3	2,76	1,3	1,45	0,12	1,37	0,53
	B4	3,22	2,83	2,05	1	1,83	1,17
	B5	1,42	0,92	2,34	0,95	1,97	0,96
	B6	1,46	0,65	1,87	0,62	1,4	0,52
	B7	2,96	0,87	1,3	0,01	1,51	0,5
ÍNDICE ESPECTRALES	NDVI	2,52	0,74	0,01	0,54	1,25	0,54
	GEMI	1,15	0,62	2,37	0,72	1,96	0,65
	NBR	0,12	1,49	1,6	1,84	1,23	1,78
	IAQ	1,68	1,68	1,99	1,56	1,67	1,39
	BAIM1	1,56	1,51	2,04	1,45	1,65	1,37
	BAIM2	1,22	1,31	1,46	1,28	1,16	1,22



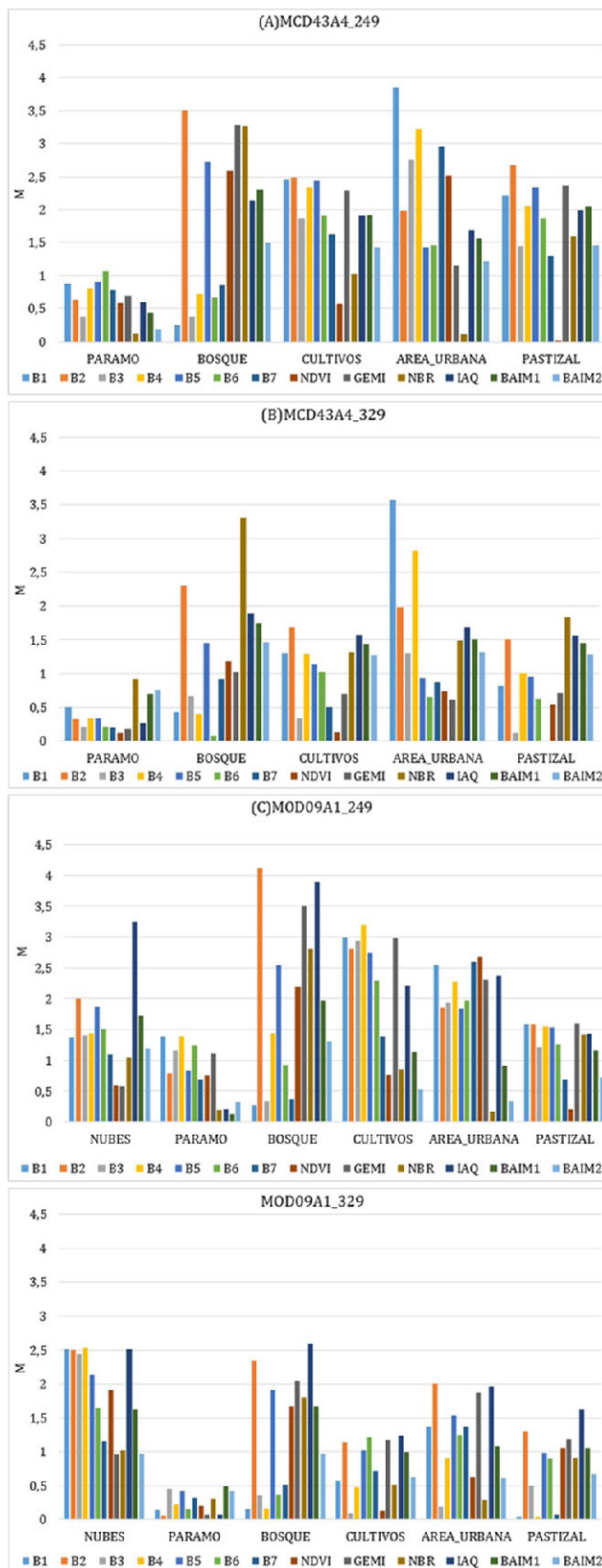


Figura.6 Valores de separabilidad M de las cubiertas analizadas con respecto al área quemada.

- A) producto MCD43A4 de septiembre 2012 (día 249),
- B) producto MCD43A4 de noviembre 2012 (día 329),
- C) producto MOD09A1 de septiembre 2012 (día 249),
- D) producto MOD09A1 de noviembre 2012 (día 329)

En el presente estudio se han analizado los factores más importantes relacionados con la definición de una metodología operativa para la cartografía de incendios forestales en Ecuador a partir de teledetección. Estos factores se refieren al tipo de imágenes, productos, fechas y bandas/índices más adecuados para discriminar espectralmente las áreas quemadas de otras cubiertas naturales y artificiales.

El alcance del presente estudio ha estado limitado por dos factores ajenos al mismo: en primera instancia por la cobertura de nubes existente en las fechas en las que se presenta la época de incendios forestales en la zona de estudio que ha dificultado la obtención de imágenes; en segundo lugar por el tamaño de los incendios ya que la escala a la cual se trabaja con los productos MODIS no permite discriminar incendios pequeños, por lo cual fue preciso ampliar la zona de estudio con el fin de obtener información de siniestros de mayor tamaño.

#### IV. CONCLUSIONES

Respecto a la selección de imágenes. En el estudio se ha puesto de manifiesto la imposibilidad de abordar la cartografía de incendios en Ecuador mediante imágenes de resolución espacial media-alta del tipo Landsat. La elevada cobertura nubosa impide obtener una serie de imágenes adecuada para esta aplicación desde el punto de vista espacial y temporal. La alternativa más conveniente es recurrir a imágenes de resolución espacial media-baja y temporal alta tipo MODIS. Este tipo de imágenes tienen una frecuencia temporal y resolución espectral adecuada para la cartografía de incendios aunque su resolución espacial limita las posibilidades de obtener información de áreas quemadas sólo para los incendios de mayor tamaño (> 100 ha). En general estos grandes incendios son los que producen mayores pérdidas ambientales y económicas por lo que el interés de obtener una cartografía sistemática y actualizada de estos eventos es evidente.

Respecto a la selección de productos MODIS. Los resultados indican que los productos con y sin corrección del BRDF ofrecen resultados muy similares en cuanto a su capacidad para discriminar áreas quemadas cuando se analizan imágenes adquiridas inmediatamente después de la ocurrencia del incendio. Sin embargo el producto MCD43A4 parece más recomendable cuando se recurre a imágenes adquiridas varios meses después del incendio.

En lo que se refiere a la selección temporal de las imágenes para la cartografía de áreas quemadas, los resultados obtenidos muestran claramente el interés de contar con imágenes adquiridas en fechas lo más próximas posible a la ocurrencia de los incendios, debido a que, con el tiempo, existe una pérdida de los depósitos de carbón y cenizas, dificultando la discriminación de áreas quemadas. Por lo tanto, para una metodología operativa se recomienda analizar todas las imágenes libres de nubes disponibles a lo largo de la estación de incendios.

Por último, en lo que respecta a la información espectral más adecuada para realizar la cartografía, este estudio concluye que las bandas NIR y SWIR son las más adecuadas para la discriminación de áreas quemadas respecto a otras cubiertas de la imagen. Sin embargo, la banda 7 de MODIS presenta una menor separabilidad que las bandas 5 y 6 por lo que se podría plantear el uso de estas bandas en nuevas propuestas de índices adaptados a las características de la zona de estudio. Por la ubicación de los incendios, principalmente en zonas de páramo, existe dificultad al momento de discriminar éstas co-

berturas, por lo que podrían también utilizarse los resultados obtenidos en este trabajo para definir índices específicos que permitan discriminar mejor este tipo de cubierta.

La escasa información existente con respecto a los incendios forestales en la zona de estudio no permitió realizar una cartografía y validación de los resultados obtenidos. Sin embargo, consideramos que los hallazgos metodológicos de este

trabajo servirán de base para posteriores estudios que aborden el análisis de series temporales más largas y zonas más extensas que permita demostrar la posibilidad de utilizar las imágenes MODIS para realizar un seguimiento de la ocurrencia de incendios en Ecuador complementando la información facilitada por las fuentes oficiales.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, por darme las fuerzas que se necesitan para seguir con paso firme por este camino que es la vida.

A la Doctora María del Pilar Martín, por el apoyo incondicional y la transferencia de conocimientos que ha permitido llegar a los objetivos planteados.

Al Ing. Omar Delgado, por su apoyo, tiempo y consideración para lograr culminar con este trabajo de tesis.

A Juan Pablo, mi esposo, por su apoyo constante y por impulsarme siempre a ser mejor.

## REFERENCIAS

Chuvieco, E. et al., 2006. Cartografía global de áreas quemadas en América Latina: experiencias del proyecto AQL2004. XII Simposio Internacional en Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica; Cartagena - Colombia. Available at: [http://quemadas.cptec.inpe.br/~rquemadas/documentos/200609\\_chuvieco\\_etal\\_aql2004\\_12selper\\_cartagena.pdf](http://quemadas.cptec.inpe.br/~rquemadas/documentos/200609_chuvieco_etal_aql2004_12selper_cartagena.pdf).

García-Mora, T.J. & Mas, J.F., 2011. Evaluación de imágenes del sensor MODIS para la cartografía de la cobertura del suelo en una región altamente diversa de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), pp.83-94.

González, D., Quintano Pastor, C. & Shimabukuro, 2009. Análisis de imágenes basado en objetos aplicado a imágenes fracción derivadas del sensor MODIS para cartografiar áreas quemadas en la cuenca Mediterránea. *Anais do XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Natal-RN*, (978-85-17-00044-7), pp.2737-2743. Available at: <http://mar.tecn.br/col/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/10.20.21.29/doc/2737-2743.pdf>.

González, F. & Merino, S., 2009. Estimación De Superficies Quemadas Mediante Teledetección : Los Incendios De Galicia De Agosto 2006. *Actas de las I Jornadas Técnicas SIGTEFOR, Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 29(1575-2410), pp.39-47. Available at: [seforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernossecf/article/.../1086](http://seforestales.org/publicaciones/index.php/cuadernossecf/article/.../1086).

Groot, W.J. De, Flannigan, M.D. & Stocks, B.J., 2012. El Cambio Climático y los Incendios. *Memorias del Cuarto Simposio Internacional Sobre Políticas, Planificación y Economía de los Incendios Forestales: Cambio Climático e Incendios Forestales*, pp.1-12. Available at: [http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw\\_gtr245/es/psw\\_gtr245\\_001.pdf](http://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr245/es/psw_gtr245_001.pdf).

Heredia Laclaustra, A. et al., 2003. COMPARACIÓN DE DISTINTAS TÉCNICAS DE ANÁLISIS DIGITAL PARA LA CARTOGRAFÍA DE ÁREAS QUEMADAS CON IMÁGENES LANDSAT ETM+. *Geofocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, (1578-5157), pp.216-234. Available at: [http://geofocus.rediris.es/docPDF/Articulo12\\_2003.pdf](http://geofocus.rediris.es/docPDF/Articulo12_2003.pdf).

Matín, P., Díaz Delgado, R. & Chuvieco, E., 2002. Burned land mapping using NOAA-AVHRR and TERRA-MODIS. *Proceedings: Forest fire*, pp.1-9. Available at: [http://www.ebd.csic.es/ricardo/publi/Martin\\_etal\\_2002.pdf](http://www.ebd.csic.es/ricardo/publi/Martin_etal_2002.pdf).

Pavón, P.O. & Rodríguez-Verdú, F., 2006. Cartografía de área quemada.

Pereira, J.M.C., 1999. A comparative evaluation of NOAA/AVHRR vegetation indexes for burned surface detection and mapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1 PART 1), pp.217-226.

Saldivia, S.O. & Salinero, E.C., 2007. Utilización de productos MODIS para la cartografía de áreas quemadas. , pp.27-43.

Santis, A. De & Vaughan, P., 2009. Revisión de las técnicas de identificación cartográfica de áreas quemadas. *IBADER: Instituto de Biodiversidad de Agraria e Desenvolvimento Rural*, 5(1885-5547), pp.93-100. Available at: <http://hdl.handle.net/10347/3819>.

Valenzuela, J.G. et al., 2008. Detección y cuantificación de área quemada por incendios forestales utilizando geomática. *Ambiencia*, 4(2175-9405), pp.107-122. Available at: <http://revistas.unicentro.br/index.php/ambiencia/article/view/279/372>.

Verdú, F. & Salas, J., 2010. CARTOGRAFÍA DE ÁREAS QUEMADAS MEDIANTE ANÁLISIS VISUAL DE IMÁGENES DE SATÉLITE EN LA ESPAÑA PENINSULAR PARA EL PERÍODO 1991- 2005. *Geofocus, Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 10(1578-5157), pp.54-81. Available at: [http://geofocus.rediris.es/2010/Articulo3\\_2010.pdf](http://geofocus.rediris.es/2010/Articulo3_2010.pdf).

Fallah Ghalhari, G. A., Dadashi Roudbari, A. A., & Asadi, M. (2016). Identifying the spatial and temporal distribution characteristics of precipitation in Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(12), 595. <https://doi.org/10.1007/s12517-016-2606-4>

Wang, X. L., Chen, H., Wu, Y., & Feng, Y. (2010). New Techniques for the Detection and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2416-2436. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>

Zhang, X., & Srinivasan, R. (2009). GIS-Based Spatial Precipitation Estimation: A comparison of Geostatistical approaches, 45(4), 894-906.

# Análisis delictivo en el cantón Cuenca, Ecuador, aplicando técnicas espaciales apoyadas por SIG libre

Bravo López, Paúl Esteban

Department of Geoinformatics/Universidad de Salzburgo  
Santiago/Región Metropolitana/  
Chile  
paulbravolopez7@gmail.com

## RESUMEN

El análisis del crimen comprende una serie de enfoques; de ellos, el espacial es muy importante ya que destaca la importancia de la ubicación donde ocurre un delito. Por esta razón, las instituciones involucradas en temas de seguridad deben contar con métodos que incluyan esta clase de análisis, con el fin de mejorar su trabajo operativo.

Esta investigación abarca el análisis espacial de diferentes delitos ocurridos en el cantón Cuenca, Ecuador a nivel urbano y rural, durante el año 2015 mediante la aplicación de diferentes técnicas que permiten detectar la distribución de los datos y la existencia de concentración de delitos utilizando software libre y destacando la importancia de los Sistemas de Información Geográfica para el análisis del crimen.

La metodología aplicada, se basa en un estudio teórico de técnicas espaciales útiles para el análisis delictivo como Media aritmética espacial, Elipse de desviación estándar, Análisis por agrupación, Análisis del vecino más cercano y Kernel Density Estimation junto con el software utilizado; además de todas las etapas que deben cumplirse imprescindiblemente para la obtención de análisis confiables y verídicos. Estas etapas contienen varios aspectos importantes como la obtención de información confiable, la transformación espacial de esa información y la elaboración de los resultados finales que se presentan mediante mapas, los cuales plasman las diferentes técnicas de análisis investigadas.

Los resultados obtenidos, permiten detectar las zonas de la ciudad y parroquias rurales que presentan mayores índices delictivos, los cuales se corroboran al aplicar diversas técnicas. Es importante mencionar que a nivel urbano dichas zonas se concentran alrededor de sitios donde existe concentración de gente como plazas, parques, centros comerciales y de transporte y a nivel rural en parroquias cercanas al área urbana del cantón.

Palabras clave: **Análisis espacial, Análisis del crimen, Hot Spot, Software libre, Cuenca.**

## ABSTRACT

*Crime analysis includes a number of approaches. Among them, the spatial one is very important since it emphasizes the importance of the location where a crime occurs. For this reason, the institutions involved in security issues should have methods that include*

*this type of analysis, in order to improve their operational work.*

*This research covers the spatial analysis of different crimes occurring in the canton Cuenca, Ecuador at urban and rural level, during the year of 2015, through the application of different techniques to detect the distribution of data and the existence of concentration of crimes, using free software and highlighting the importance of Geographic Information Systems for the analysis of crime.*

*The applied methodology is based on a theoretical study of useful spatial techniques for criminal analysis such as Mean Center, Standard Deviation Ellipse, Cluster Analysis, Nearest Neighbor Index and Kernel Density Estimation together with the software used; in addition to all common stages that must be fulfilled and which are essential for obtaining reliable and veridical analyzes. These stages contain several important aspects such as obtaining reliable information, spatial transformation of this information and the elaboration of the final results that are presented through maps, which reflect the different techniques of investigated analysis.*

*The obtained results allow detecting the zones of the city and rural parishes that present high criminal indices, which are corroborated when applying diverse techniques. It is important to mention that, at the urban level, these areas are concentrated around places where there is concentration of people such as squares, parks, shopping centers and transport centers and, at a rural level, in parishes near the urban area of the canton.*

**Keywords:** *Spatial analysis, Crime analysis, Hot Spot, Free Software, Cuenca.*

## I. INTRODUCCIÓN

Desde tiempos remotos la delincuencia ha sido asociada con el espacio. Ruiz García (2012) menciona que autores que datan del siglo XVIII como Henry Fielding, Patrick Colquhoun y Bernard Mandeville describieron características inherentes de la criminalidad que se refieren principalmente a ámbitos sociales y espaciales.

Akpinar y Usul (2004) afirman que la distribución de incidentes criminales en el espacio no se da en forma geográficamente aleatoria, ya que estos incidentes son fenómenos humanos; y por ello, para que un incidente ocurra, el delincuente y su víctima deben estar en la misma ubicación en un periodo de tiempo. Esto permite afirmar la importancia de conocer la localización de los diferentes actos delictivos en un centro poblado.

Con el paso del tiempo, el surgimiento de nuevas herramientas ha posibilitado perfeccionar las diferentes técnicas de análisis del crimen, principalmente mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), llegando a implementarse la denominada "geografía del crimen" a través de varios estudios que involucran otras ciencias sociales como Psicología y Sociología (Ruiz García, 2012).

La investigación se realizará con información delictual de sucesos registrados en el cantón Cuenca, uno de los más importantes de Ecuador, el cual se ha visto afectado por actos criminales que alteran la tranquilidad de sus habitantes. Dentro de este, existen sectores "tradicionalmente" peligrosos que son evitados por la ciudadanía para la realización de diferentes actividades.

El objetivo principal de la investigación consiste en analizar espacialmente las muertes violentas y robos - hurtos a domicilios, personas y vehículos ocurridos en el cantón Cuenca, Ecuador a nivel urbano y rural durante el año 2015, y del cual se derivan objetivos específicos como la identificación de los sectores con mayor índice delictivo del cantón en estudio dentro de la zona urbana; la determinación de las parroquias rurales del cantón en estudio con mayor incidencia delictiva y la evaluación de las principales herramientas de software libre útiles para su aplicación en análisis de actos delictivos.

Lo mencionado anteriormente permitirá a las instituciones competentes contar con una metodología de trabajo útil para sus procesos de combate a la delincuencia.

Finalmente, es importante mencionar que se cuenta con varios trabajos previos de temas similares, sin embargo, la investigación realizada por Alberto Ruiz García (2012) "SIG Crimen y Seguridad", es destacable, ya que contiene una metodología similar a la descrita en este trabajo, pero aplicada a la ciudad de Madrid, España y con la utilización de diferente software SIG.

## II. MÉTODO

El proceso metodológico inicia con la selección de datos delictivos, para con ellos elaborar las estadísticas globales y aplicar las técnicas de análisis espacial que permitan verificar la existencia de clusters, implementar densidades y determinar las parroquias rurales con mayor índice delictivo; para finalmente elaborar los mapas que permitan verificar los resultados y plantear una metodología de trabajo que pueda ser utilizada por las instituciones involucradas en asuntos de seguridad ciudadana.

Para la obtención de mejores resultados, es importante contar con algunos datos referentes a la zona de estudio, los cuales se resumen en la Tabla I:

**TABLA I**  
Definición de valores específicos para la realización de análisis de acuerdo a la zona urbana de Cuenca.

PARÁMETRO	VALOR
Longitud de calles de la zona urbana)	1.253.833,52319 m.
Área de la zona urbana	76.369.938,29107 m <sup>2</sup>
Coordenadas del punto inferior izquierdo	X: 714.265 Y: 9.675.306
Coordenadas del punto superior derecho	X: 734.271 Y: 9.687.848

Para determinar el índice delictivo, es necesario basarse en datos que permitan conocer donde éstos se han cometido. El método más utilizado para registrar la ocurrencia de un delito es la denuncia, las cuales son receptadas principalmente por

la Fiscalía General que cuenta con sedes en todas las provincias del país. Estos datos en formato no espacial deben ser georreferenciados para brindarles el enfoque espacial necesario y poder trabajarlos en un SIG.

Además es importante mencionar que, dada la gran extensión de las parroquias rurales, los procedimientos de georreferenciación que se realizan en ellas no presentan gran precisión, por ello el análisis en esta clase de parroquias se basa en conocer la frecuencia de ocurrencia de los delitos analizados para determinar cuáles presentan un mayor índice delictivo. A nivel urbano, la situación es diferente, ya que se cuentan con capas de calles, predios, manzanas, edificios, entre otras, que permiten ubicar de una mejor manera los diferentes actos delictivos dentro de la ciudad; por ende los análisis realizados en esta investigación se enfocan mayoritariamente en el área urbana del cantón en estudio.

A continuación se describen de forma breve cada uno de los análisis realizados en esta investigación.

**ESTADÍSTICAS GLOBALES:** Las estadísticas principales determinadas fueron Mean Center (MC) y Standard Deviational Ellipse (SDE), los cuales son los análisis más simples, pues no implicaron realizar procedimientos largos ni complejos. Es válido recalcar que el MC es el punto en el que la distribución que se encuentra en equilibrio, es decir es el “centro de gravedad” de la distribución de datos y la SDE describe la distribución espacial del conjunto de datos, dando a conocer su dispersión y orientación la cual se calcula alrededor del MC y abarca aproximadamente el 68 % de los casos.

**VERIFICACIÓN DE CLUSTERS:** Los agrupamientos o clusters fueron detectados aplicando la técnica Nearest Neighbor Hierarchical Clustering (NNH) mediante convex hulls: polígonos que contienen un cierto número de puntos del conjunto de datos analizado. La razón por la que se utilizó esta técnica fue debido a que permitió detectar agrupaciones de delitos, e identificar los sectores más críticos.

Es elemental mencionar que según la cantidad de datos, será la extensión del polígono generado; con muchos datos los polígonos serán pequeños, debido a que estos no están demasiado dispersos, pero con pocos datos, la dispersión entre ellos aumenta y se generan polígonos más grandes. Para una mejor comprensión de lo antes mencionado se adjunta la Figura 1:

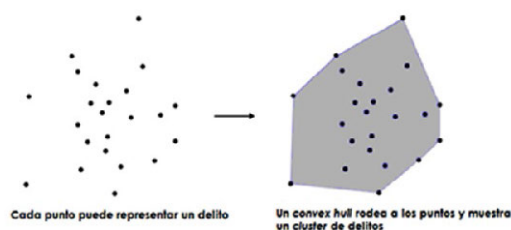


Figura 1: Ilustración de convex hulls aplicados al análisis delictivo.

En este sentido, es importante definir algunos conceptos referentes a esta técnica, que van a permitir entender los resultados obtenidos de mejor manera.

**Nearest Neighbor Index:** Índice de vecino más cercano; según Levine (2013), este índice permite determinar la distancia media entre sucesos comparándola con la que se esperaría si dichos sucesos se distribuyeran de manera aleatoria. Los valores que puede tomar este índice varían entre -1 y 1 y su significado es:

Valores menores a 1: indican que los sucesos se encuentran más concentrados de lo que se espera en una distribución aleatoria.

Valores cercanos a 1: indican que los hechos se distribuyen de manera aleatoria.

Valores mayores a 1: los sucesos se encuentran más dispersos de lo que se espera en una distribución aleatoria.

**Average Density (Densidad promedio):** Es el número de incidentes divididos para el área, es decir el número promedio de incidentes por unidad de área, en este caso metros cuadrados. Esta densidad también es conocida como Intensity (Levine, 2013). Para obtener resultados más precisos, es importante ingresar el área de la zona de estudio, la misma que se especificó en la Tabla I.

Los valores de Mean Nearest Neighbor y Minimum Distance también permitieron determinar qué tan agrupados estuvieron los eventos analizados.

**ANÁLISIS DE DENSIDAD:** La realización de este análisis se basa principalmente en la técnica Kernel Density Estimation (KDE), cuyo propósito es estimar la intensidad de puntos en un sector determinado. Esta intensidad se define como una densidad de puntos limitante, es decir número de puntos por unidad de área. Generalmente esta estimación se realiza en un grid de puntos que cubren el área de estudio y con base en las estimaciones de intensidad realizadas en estos puntos se genera una superficie de intensidad (Rogerson y Yamada, 2008).

Según Eck et al. (2005), la generación de superficies raster para el análisis de hot spots permite una interpretación más fácil de los patrones espaciales del crimen en comparación a otras técnicas, mostrando con una mejor precisión la distribución y ubicación de las áreas con alto índice delictivo.

Esta técnica es popular debido a que permite representar de una forma visualmente atractiva una distribución espacial; además se considera como un método preciso comparada con otras técnicas de detección de hot spots (Chainey, 2013) y según Elmes, Roedel y Conley (2014) es quizás la técnica más utilizada para la visualización de hot spots debido a su altas capacidades de predicción.

Según Chainey (2013), la manera más usual de representar geográficamente incidentes criminales es mediante puntos. KDE se aplica en dichos puntos para obtener una superficie de suavizado que representa la densidad de la distribución de puntos. En términos matemáticos KDE se expresa con la ecuación [1]:

$$f(x, y) = \frac{1}{nh^2} \sum_{i=1}^n k\left(\frac{d_i}{h}\right) \quad (1)$$

Donde  $f(x,y)$  es el valor de la densidad en la ubicación  $(x,y)$ ,  $n$  es el número de incidentes/puntos,  $h$  es el valor de ancho de banda,  $d_i$  es la distancia geográfica entre el incidente  $i$  y la ubicación  $(x,y)$  y  $k$  es la función de densidad conocida como Kernel (Chainey, 2013).

Otro aspecto que se debe destacar en KDE es la selección de dos parámetros sumamente importantes que son el ancho de banda y el tamaño de celda ya que estos serán determinantes para los resultados que se van a obtener.

De acuerdo a diversos estudios, Chainey (2013) llegó a la conclusión de que el tamaño de celda tiene un impacto pequeño en el resultado final, ocurriendo lo contrario con el tamaño del ancho de banda. El mismo autor afirma que mientras más

pequeño es el tamaño de la celda, se requiere más procesamiento computacional debido al mayor número de cálculos que se realizan. Mientras que, con anchos de banda más pequeños mejor será la capacidad del KDE para predecir patrones espaciales del crimen (Chaïney, 2013).

Al ser el ancho de banda un aspecto crítico, además de que varios autores tienen criterios diversos respecto a su elección; Moreno (2005) sugiere que dicha elección se realice según estos tres enfoques:

- Elegirlos subjetivamente ensayando con varios valores de ancho de banda y escogiendo el valor que ayude a expresar de mejor forma el mensaje que se desea transmitir.
- Asumiendo que una distribución conocida subyace a los datos
- Mediante métodos automáticos de obtención, lo cual no es aconsejable.

Es válido destacar que una de las grandes ventajas de esta técnica es su precisión a la hora de localizar y definir los límites de los hot spots, por lo que se la puede considerar como una excelente herramienta para la detección de zonas urbanas conflictivas que permita a las instituciones competentes ubicar las zonas de mayor incidencia delictiva y tomar las medidas respectivas (Ruiz García, 2012).

**DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DELICTIVO A NIVEL RURAL:** La determinación de parroquias rurales con mayor índice delictual, se realizó mediante mapas de coropletas, los cuales reflejaron las parroquias con mayor cantidad de delitos registrados, pudiendo identificarlas según una gama de colores establecida. La gama de colores cambió según la cantidad de datos analizados por cada tipo de delito.

La presentación de estos mapas puede ser muy general, debido a la dificultad que representa georreferenciar con certeza los datos en la zona rural; sin embargo brindaron información que permitió saber donde existió más concentración de los diferentes tipos de delitos. En este sentido es importante mencionar que esta determinación también puede realizarse a nivel de parroquias urbanas, sin embargo no fue necesario, pues las técnicas descritas anteriormente permitieron analizar de manera más precisa la zona urbana.

**HERRAMIENTAS UTILIZADAS:** Como se mencionó anteriormente, es importante diferenciar la aplicación de las diferentes técnicas a nivel urbano o rural, por ello la Tabla II, muestra la aplicación de las diferentes herramientas de software aplicadas, las cuales son netamente libres:

**TABLA II**  
Definición de los diferentes análisis realizados.

PROCEDIMIENTO - ANÁLISIS	DIVISIÓN ADMINISTRATIVA	SOFTWARE A UTILIZAR
Estadísticas globales (MC - SDE)	Zona urbana	CrimeStat IV
Clusters (NNH)	Zona urbana	CrimeStat IV
Densidad (KDE)	Zona urbana	QGIS
Índice delictivo en parroquias rurales	Zona rural	QGIS

### III. RESULTADOS

Los resultados que se presentan, han sido clasificados de acuerdo a los análisis mencionados en la metodología y se describen a continuación.

**ESTADÍSTICAS GLOBALES:** Como se mencionó anteriormente, MC y SDE permiten verificar la distribución de los datos. La

Tabla III, muestra los resultados obtenidos al calcular estas medidas mediante el software CrimeStat. Estos valores son el área de la SDE (en kilómetros cuadrados) y la orientación que presenta la elipse para cada tipo de delito analizado.

**TABLA III**  
Características obtenidas para SDE.

DELITO	ÁREA SDE (KM <sup>2</sup> )	ORIENTACIÓN DE LA ELIPSE
Muertes violentas	30,28	Sureste
Robo-Hurto a domicilios	29,39	Noreste
Robo-Hurto a personas	11,82	Noreste
Robo-Hurto de vehículos	23,88	Noreste

Los valores presentados en la tabla anterior permiten vislumbrar que, tres de los cuatro tipos de delitos analizados tuvieron la misma orientación de elipse, noreste, siendo todos ellos robos y hurtos; mientras que el cuarto (muertes violentas) tuvo una elipse orientada hacia el sureste. El delito que presentó una elipse de menor extensión (11.82 km<sup>2</sup>) fue robo y hurto a personas; esto se debe a que estos actos delictuales estuvieron concentrados. Los robos y hurtos a domicilios y vehículos presentaron áreas mayores a 20 km<sup>2</sup> y finalmente la extensión de la elipse correspondiente a muertes violentas tuvo una extensión mayor a 30 km<sup>2</sup> debido a la dispersión de los diferentes crímenes de esta clase.

Es importante aclarar que la orientación de la elipse refleja la orientación de la distribución de datos dentro del área investigada, en este caso, la zona urbana del cantón en estudio.

El mapa de la Figura 2 muestra el resultado de esta técnica aplicada a todos los delitos:

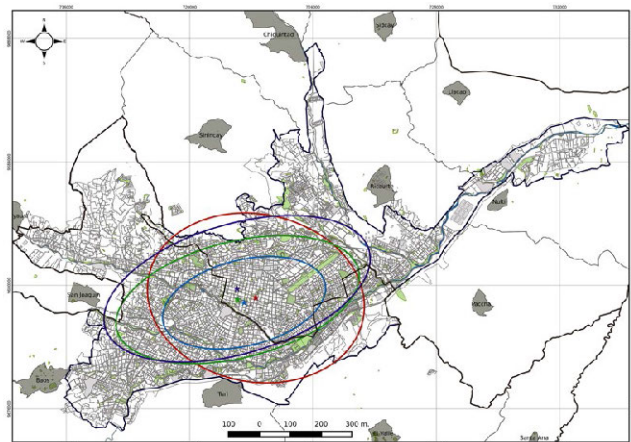


Figura 2: Mapa de resultados de MC y SDE.

**VERIFICACIÓN DE CLUSTERS:** Los parámetros más importantes respecto a los resultados obtenidos se reflejan en la Tabla IV.

**TABLA IV**  
Valores de análisis de clusters por delito.

DELITO	MNHD (METROS)	MD (METROS)	NNI
Muertes violentas	1160.67	3.54	0.95774
Robo Hurto a domicilios	107.52	0.00	0.68990
Robo Hurto a personas	63.08	0.00	0.49402
Robo Hurto de vehículos	285.41	0.00	0.84410

Donde MNHD es *Mean Nearest Neighbor Distance*, MD *Minimum Distance* y NNI *Nearest Neighbor Index*.

Observando los valores de NNI reflejados en la tabla anterior, se determinó que las muertes violentas presentaron un valor muy cercano a 1, es decir estos delitos se distribuyeron aleatoriamente. Los valores correspondientes a robos y hurtos presentaron valores menores a 1, lo cual indica concentración, sin embargo es importante notar que existió más concentración en los delitos de este tipo cometidos hacia personas y una baja concentración en los delitos cuyo objetivo eran vehículos.

El mapa de la Figura 3 muestra el resultado de esta técnica aplicado a los delitos de robos y hurtos:

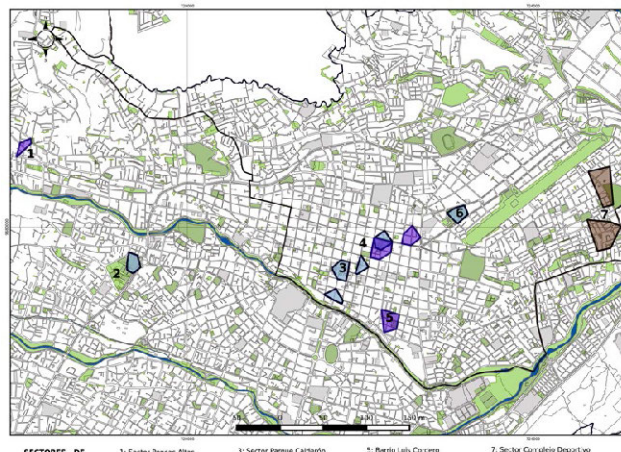


Figura 3: Mapa de clusters para delitos de robos y hurtos.

**ANÁLISIS DE DENSIDAD:** La Figura 4 presenta un mapa de aplicación de esta técnica con datos de robos y hurtos a personas, resaltando los lugares cercanos a las zonas críticas para una mejor ubicación. También fue necesario ampliar los sectores con mayor presencia de “zonas rojas” para detectar de mejor manera lugares de referencia que permitan una ubicación más certera de dichas zonas. El mapa de la figura, corresponde a robos y hurtos a personas, los cuales presentaron concentración en el centro de la ciudad, aunque se dispersaron por gran parte del área urbana.

Se debe recalcar que autores como Eck (2005) y Moreno (2005), consideran a KDE como la mejor técnica para visualizar fenómenos criminales, pues es evidente la facilidad de interpretación que presenta basada en la gama de colores correspondiente.

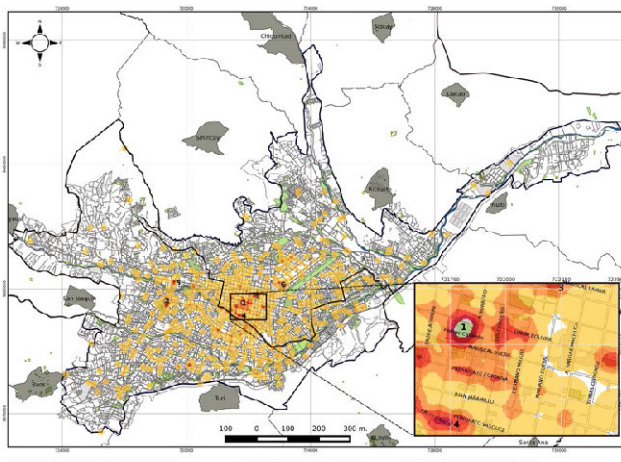


Figura 4: Mapa de densidad de robos y hurtos a personas.

**DETERMINACIÓN DE ÍNDICE DELICTIVO A NIVEL RURAL:** Los resultados obtenidos permitieron detectar las parroquias rurales con más alto índice de los diferentes delitos analizados a través de sendos mapas de coroplejas. En este sentido, se puede afirmar que para este caso la interpretación fue muy simple, ya que solamente se basó en la gama de colores, la cual indicó la frecuencia de incidentes ocurridos en cada parroquia.

La Figura 5 muestra el mapa de coroplejas correspondiente a los robos y hurtos a personas suscitados a nivel de parroquias rurales del cantón en estudio y se puede observar que la parroquia Baños es la que mayor índice presentó en este tipo de acto delictivo.

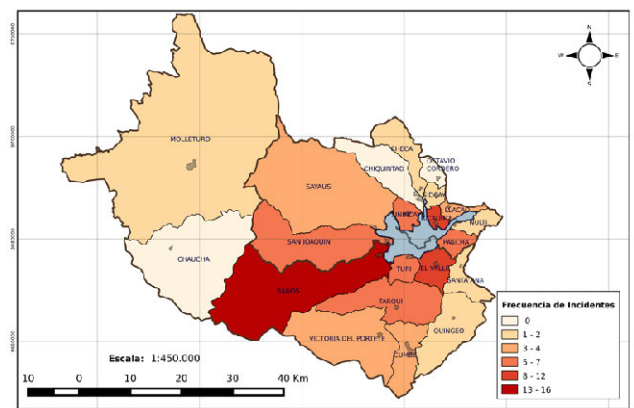


Figura 5: Mapa de coroplejas de robos y hurtos a personas.

Para cerrar este apartado es importante acotar que los resultados reflejaron los sectores con mayor concentración de hechos delictivos a nivel urbano y rural. También es importante señalar que la información obtenida para la realización de este trabajo se basó en las denuncias realizadas a las instituciones competentes, por lo que no reflejó la totalidad de actos delictivos ocurridos en el cantón.

**IV. CONCLUSIONES**

Con la realización de este trabajo se ha confirmado que el análisis espacial es la base para una detección certera de los lugares con alto índice delictivo. Además, el hecho de trabajar con SIG ha permitido resaltar la importancia que tiene el espacio, pues todos los eventos suscitados en nuestro planeta ocurren en algún lugar.

Se ha demostrado la gran utilidad que tienen los SIG para el seguimiento y análisis de actos delictivos, ya que los resultados obtenidos, permitieron detectar las zonas que presentaron altos índices de criminalidad. Akpınar y Usul (2004) mencionan que los resultados de utilizar SIG para este tipo de análisis brindan una idea acerca del estado actual de los patrones criminales.

Es importante considerar que los delitos no pueden desaparecer por sí solos, por ello las instituciones competentes, cuya tarea preponderante es proteger la seguridad de la ciudadanía y tomar medidas que ayuden a minimizar el riesgo criminal, deben identificar las ubicaciones y periodos de tiempo en los que la actividad delictiva es más propensa de ocurrir (Lab, 2000 citado en Akpınar y Usul, 2004). Precisamente la identificación de lugares con alta incidencia delictiva en el cantón en estudio durante el periodo de tiempo establecido, fue un objetivo cumplido con la realización de este trabajo.

A nivel rural fue muy complicado realizar análisis certeros, debido a que las parroquias de esta clase son muy extensas y

presentan localidades, comunidades y caseríos dispersos en toda su área. Esto hace que sea muy difícil ubicar con precisión los diferentes delitos ocurridos, razón por la cual no es posible aplicar varias de las técnicas investigadas. Sin embargo, un conteo de eventos, mediante el método de clasificación Natural Breaks ha permitido detectar la cantidad de delitos ocurridos en cada parroquia.

A nivel urbano ha sido posible detectar de mejor manera las zonas de concentración (hot spots) de los delitos aplicando las diferentes técnicas estudiadas. Se puede evidenciar que Kernel Density Estimation (KDE) es muy buena para cumplir este objetivo, ya que la superficie que genera permite identificar fácilmente las zonas de alta densidad con base en una gama de colores. Se debe considerar que los parámetros críticos utilizados en esta técnica (radio y tamaño de celda) son

esenciales para que los resultados se acoplen a la realidad de la zona de estudio.

Las herramientas de análisis espacial utilizadas en este trabajo de investigación fueron en su totalidad software libre. Se logró demostrar que el hecho de no contar con presupuestos para la adquisición de herramientas SIG de alto costo, no es una razón para dejar de lado este tipo de análisis. Si bien el manejo de estas herramientas es más complejo en comparación con las privativas, los resultados obtenidos fueron muy útiles.

De acuerdo a los resultados, es importante plantear a futuro la realización de análisis más complejos que brinden un seguimiento más amplio de los problemas delictivos, por ejemplo análisis predictivos o análisis de rutas del crimen.

## REFERENCIAS

- Akpınar, E. y Usul, N. (2004). Geographic information systems technologies in crime analysis and crime mapping. [Archivo PDF]. Proceedings. ESRI.
- Chainey, S. P. (2013). Examining the influence of cell size and bandwidth size on kernel density estimation crime hot spot maps for predicting spatial patterns of crime. [Archivo PDF]. Bulletin of the Geographical Society of Liege, 60, 7-19.
- Chainey, S. y Ratcliffe, J. (2013) GIS and Crime Mapping Mastering GIS: Technology, Applications & Management. John Wiley & Sons.
- Eck, J., Chainey, S., Cameron, J., y Leitner, M. (2005). Mapping Crime: Understanding Hot Spots. U.S. Dept. Of Justice, Office of Justice Programs, National Institute of Justice. Washington D.C.
- Elmes, G., Roedl, G., y Conley, J. (2014). Forensic GIS: The Role of Geospatial Technologies for Investigating Crime and Providing Evidence (Vol. 11). United States of America: Springer.
- Levine, N. (2013d). Chapter 5: Distance Analysis I and II. CrimeStat IV: A Spatial Statistics Program for the Analysis of Crime Incident Locations, Version 4.0). The National Institute of Justice, Washington, DC.
- Moreno, A. (2005). Modelización cartográfica de densidades mediante estimadores Kernel. [Archivo PDF]. Treballs de la Societat Catalana de Geografia, (30), 155-170.
- Rogerson, P., y Yamada, I. (2008). Statistical detection and surveillance of geographic clusters. United States of America: CRC Press.
- Ruiz García, A. (2012). SIG, crimen y seguridad. Análisis, predicción y prevención del fenómeno criminal.(Tesis de maestría publicada). Universidad Complutense de Madrid, España.



# Detección de patrones secuenciales generalizados de movilidad de ciclistas a partir de datos crowdsourcing

Quezada Adriana, Orellana Daniel

LlactaLAB, Departamento de  
Espacio y Población, Universidad  
de Cuenca  
Av. 12 de Abril, Cuenca/Azuay/  
Ecuador  
adriana.quezada@ucuenca.edu.ec,  
daniel.orellana@ucuenca.edu.ec

## RESUMEN

La movilidad en bicicleta conlleva beneficios para el ambiente, la economía y la salud de la población. No obstante, la adopción de la bicicleta como medio de transporte, está limitada por la carencia de geoinformación detallada que describa el comportamiento de los ciclistas y permita la creación de estrategias adecuadas de planificación y promoción. En este estudio presentamos un método para obtener conocimiento sobre los patrones de movilidad de ciclistas urbanos utilizando datos crowdsourcing, minería de datos y técnicas de visualización de geo-información. Demostramos la viabilidad del método analizando un año de datos de la aplicación Strava METRO en la ciudad de Cuenca, y extrayendo y visualizando patrones secuenciales generalizados (GSP) de movimiento. Los resultados evidencian que la aplicación del método propuesto permite generar información relevante para el conocimiento sobre movilidad no motorizada utilizando conjuntos masivos de datos recolectados con técnicas de crowdsourcing.

Palabras clave: **movilidad no motorizada, bicicletas, geoinformación de crowdsourcing, patrones secuenciales generalizados, comportamiento colectivo espacial.**

## ABSTRACT

*Bicycle mobility lead to environmental, economic and health benefits to the population. Nonetheless, the implementation of bicycle-based transport systems is limited due to lack of detailed geodata describing the behavior of cyclists in order to build appropriate planning and promotion strategies. In this study, we present a method to extract knowledge about urban cyclist's mobility patterns using crowdsourced geodata, data mining and geodata visualization techniques. We demonstrate the viability of the method by analyzing a year-long data from the Strava METRO application in the city of Cuenca (Ecuador); and extracting and visualizing generalized sequential patterns (GSP) of movement. The results that data mining analysis technique applied to massive datasets allows the generation of relevant information about the non-motorized mobility knowledge.*

**Keywords: non-motorized mobility, bikes, crowdsourced geoinformation, generalized sequential patterns, collective spatial behavior.**

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente, la movilidad no motorizada, sea a pie o en bicicleta, se posiciona como una estrategia potente de mitigación ante el actual detrimento de la calidad ambiental, económica, y de la salud de la población. El predominio de la movilidad motorizada como medio de transporte y el incremento del parque automotor, son factores impulsores del aumento de las emisiones de gas de efecto invernadero, ante lo cual, grupos de expertos a nivel global sugieren a los gobiernos incentivar la inversión en transporte público, en la construcción de infraestructura para peatones y ciclistas, a fin de adoptar sistemas de transporte modales de baja emisión de CO<sub>2</sub>. (Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M.J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J.J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari, 2014). En el campo de la salud, se ha definido a la bicicleta como un medio de transporte saludable. El uso de la bicicleta incrementa la condición física de las personas, mitigando los efectos nocivos del sedentarismo, los cuales se intensifican con el uso del auto privado (Fishman, 2016).

Ante los beneficios de este medio de transporte, planificadores e investigadores se cuestionan cómo incrementar la movilidad en bicicleta. Varias investigaciones a nivel mundial han encaminado sus esfuerzos al análisis de propuestas para el fomento del uso de la bicicleta. Los resultados evidencian que la dotación de infraestructura completa (vías, señalización, iluminación, parqueaderos, etc.) impacta más en la movilidad en bicicleta que la implementación parcial de esta (Pucher, Dill, & Handy, 2010). De acuerdo a Fishman (2016), aproximadamente al 60% de la población tiene interés en utilizar la bicicleta, pero al mismo tiempo les preocupa hacerlo por la falta de seguridad. Es clave que las estrategias para incrementar el número de usuarios incluyan la implementación de redes de ciclovías, complementadas con zonas de parqueo, señalización, iluminación, así como aspectos del como la disminución del tráfico vehicular, la accesibilidad a amenidades y servicios en las rutas, señalización, entre otros, a fin de mejorar la percepción de seguridad del usuario (Fishman, 2016). En efecto, los países que registran mayor actividad de ciclistas cuentan con una infraestructura extensa y segura (Pucher, Dill, & Handy, 2010). Otros aportes que la investigación ha hecho se enmarcan en la obtención de datos descriptivos y detallados de la movilidad en bicicleta, como son: el número de viajes, su origen y destino, el espacio geográfico y temporal, características demográficas y socioeconómicas de los usuarios, así como sus percepciones y motivaciones (Handy, van Wee, & Kroesen, 2014). No obstante, las ciudades afrontan el desafío de motivar el uso de la bicicleta como medio de transporte, con recursos económicos limitados. El entender el comportamiento espacial de los ciclistas, permite optimizar esos recursos e invertir de manera efectiva en la planificación de la movilidad no motorizada en bicicleta. Sin embargo, datos descriptivos que expliquen el comportamiento de los ciclistas generalmente son escasos, a veces inexistente, y su obtención es costosa (Iacono, Krizek, & El-Geneidy, 2010).

### DATOS CROWDSOURCING Y LA MOVILIDAD EN BICICLETA

La aparición de datos abiertos y Big Data, representa un instrumento idóneo tanto para planificadores urbanos y de transporte, así como para la comunidad científica que se enfoca en el estudio de la movilidad no motorizada en bicicleta, al ser información geolocalizada disponible, de rápida expansión y muchas veces, de acceso abierto. En el ámbito del estudio de la movilidad en bicicleta, estos recursos han sido ampliamente utilizados. Aspectos como el tráfico, los flujos,

el comportamiento, los modos de transporte, tipos de viaje, entre otros, han sido medidos con datos provenientes del sistema de geo-localización espacial. Estos han sido analizados y complementados con el uso de sistemas de información geográfica, plataformas virtuales, dispositivos móviles, teléfonos móviles inteligentes, y aplicaciones móviles de información geográfica voluntaria y crowdsourcing. Esta última, ha sido ampliamente usada por ciclistas, permitiendo la recolección masiva de datos. Entre las aplicaciones más populares están *Endomondo*, *MapMyRide* y *Strava*. Actualmente empresas como Strava METRO, comercializan estos datos para la planificación e investigación sobre movilidad no motorizada (Romanillos, Austwick, Ettema, & De Kruijf, 2015). De hecho, en los últimos, varios estudios los han utilizado para identificar: patrones de tiempo de los viajes, frecuencias, tipos de viaje, rutas origen-destino (Selala & Musakwa, 2016), volumen de tráfico de ciclistas y su asociación con factores del entorno (Jestico, Nelson, & Winters, 2016), evaluación de intervenciones en la infraestructura de la movilidad no motorizada (Heesch & Langdon, 2016), el rol de la movilidad en bicicleta en la actividad física (Handy et al., 2014), entre otros. El resultado de estas investigaciones evidencia que la información crowdsourcing de Strava es útil (Heesch & Langdon, 2016; Jestico et al., 2016; Romanillos et al., 2015; Selala & Musakwa, 2016). Comparada con otras metodologías de recolección de datos, como el conteo manual, la información proporcionada por Strava es útil (Jestico et al., 2016), no solo por la cantidad de datos, sino por la capacidad de abarcar simultáneamente escalas mayores, apropiadas para la planificación urbana (Griffin & Jiao, 2015). Sin embargo, se advierte no considerar los datos crowdsourcing como una muestra representativa de la población de ciclistas, ni una manera de identificar ciclistas potenciales (Griffin & Jiao, 2015; Romanillos et al., 2015). Quienes utilizan este tipo de aplicaciones generalmente son personas interesadas en conocer su condición física, sus rutas, la calidad de aire, etc. Esta falta de representatividad se traduce a términos de localización geográfica, aspectos demográficos y socioeconómicos (Romanillos et al., 2015). De hecho, estudios han demostrado que el número de viajes identificados con la aplicación se relaciona con el nivel de ingreso de sus usuarios (Selala & Musakwa, 2016).

Los datos crowdsourcing aportan principalmente a los planificadores y tomadores de decisiones; es información que les permite mejorar el entendimiento del comportamiento espacial de los ciclistas, y tener un acercamiento a las cualidades espaciales de sus rutas preferidas y de las que evitan, siendo insumos importantes para el diseño y planificación de infraestructura de movilidad en bicicleta, y para el monitoreo de la existente. Pocos son los estudios que se han enfocado en el campo de la planificación urbana, y en el desarrollo de metodologías para analizar las rutas registradas (Romanillos et al., 2015). En este sentido, es importante considerar que, si bien la información de estas bases de datos se caracteriza por su nivel de detalle, su utilidad sólo se manifiesta una vez que se detectan y se visualizan patrones que evidencian el comportamiento colectivo espacial de los ciclistas.

### DETECCIÓN DE PATRONES DE MOVILIDAD EN BICICLETA

Los datos crowdsourcing de actividades en bicicleta, por si solos, no evidencian patrones que describen las rutas preferidas por el colectivo de ciclistas, sino únicamente las rutas individuales agregadas y anonimizadas. Al respecto, la minería de datos ofrece algoritmos enfocados al análisis de datos espaciales de trayectoria, que permiten extraer conocimiento de conjuntos de datos. La minería de datos de patrones de trayectoria facilita el análisis de patrones de movimiento de

un gran volumen de datos espaciales, identificando patrones donde varios individuos se mueven en conjunto, patrones de rutas o espacios comunes (clusters) de objetos en movimiento, patrones de periodicidad, y patrones secuenciales de una trayectoria o de un conjunto de trayectorias (Zheng, 2015). La minería de patrones secuenciales es un proceso que extrae patrones secuenciales específicos cuyo valor de soporte excede un valor mínimo de soporte predeterminado. Los patrones extraídos con este proceso son secuencias que describen comportamientos comunes útiles para propósitos como: la detección de rutas apropiadas, predecir localizaciones, entender trayectos, etc., para diferentes propósitos en varios campos de las ciencias (Orellana, Bregt, Ligtenberg, & Wachowicz, 2012/6; Slimani & Lazzez, 2013; Zheng, 2015). La detección de aspectos comunes se ejecuta en base a un orden relativo y no absoluto (Orellana et al., 2012). Existen cinco algoritmos base para la extracción de los patrones secuenciales: *Apriori-like algorithm*, *Breadth First Search-based algorithm*, *Depth First Search-based algorithm*, *incremental-based algorithm* y *closed sequential patterns based algorithm*; a partir de estos se han desarrollado una serie de algoritmos que los han perfeccionado (Slimani & Lazzez, 2013). Es el caso del algoritmo BIDE, desarrollado para extraer patrones secuenciales generalizados (GSP), en base al esquema de control de cierre de secuencias denominado *BI Directional Extension*. Su eficacia radica en no necesitar un candidato (conjunto de patrones secuenciales generalizados) para identificar o validar nuevos patrones, lo que optimiza el uso de memoria en su proceso (Wang & Han, 2004). La relevancia de los GSPs se determina en base a un análisis exploratorio y a criterios subjetivos y objetivos. Los criterios son objetivos cuando su análisis se basa en datos crudos y en la aplicación de teorías de probabilidad, de estadística, o de información. Los criterios son subjetivos cuando en su análisis intervienen los datos y el usuario de los datos, ante el cual la novedad y la sorpresa queda a su juicio en base a conocimientos adquiridos. (Geng & Hamilton, 2006).

#### MOVILIDAD NO MOTORIZADA EN CUENCA

La ciudad de Cuenca, es la tercera cabecera cantonal más importante del Ecuador y se localiza en la zona montañosa de los Andes al sur del país. La ciudad crece de manera dispersa, continua y con baja densidad. Está formada por 15 parroquias urbanas y 21 parroquias rurales. Siguiendo las tendencias globales, en Cuenca, la movilidad motorizada es la que predomina como medio de transporte; el crecimiento del parque automotor ha incrementado al 11% anual, y consecuentemente, la disminución de la calidad del aire, considerando que el sector del transporte representa el 57% de emisiones de gases efecto invernadero local, llegando a índices de contaminación aún menores a la norma establecida por el Ministerio del Ambiente del Ecuador (BID, 2015). El panorama para la movilidad no motorizada en Cuenca no es alentador; el 24% de la población se desplaza a pie, y apenas el 1% en bicicleta (“Colectivo Cuenca Ciudad para Vivir,” 2016). El gobierno local ha desarrollado proyectos para motivar el uso de la bicicleta como transporte público, mediante la “Red Urbana de Ciclovías” y la “Bicicleta Pública para Cuenca” (BID, 2015), y desde el 2012 se incorpora parcialmente infraestructura para bicicletas en la ciudad. Los estudios realizados han favorecido a identificar el perfil del usuario (género, edad, ocupación, etc.) de diferentes medios de transporte, los viajes origen-destino, las características de los viajes (tiempo, motivo, medio de transporte) (GAD Municipal del Cantón Cuenca, 2015), entre otros aspectos; sin embargo, muy poco se conoce en relación a las trayectorias individuales y las rutas más frecuentadas por el colectivo de ciclistas en Cuenca, es decir, sobre su comportamiento espacial. Es así,

que en el marco del proyecto “Pies y Pedales”, desarrollado por el grupo de investigación LactaLAB - Ciudades Sostenibles de la Universidad de Cuenca, proponemos detectar, extraer y visualizar patrones secuenciales generalizados de movilidad de ciclistas de la zona urbana de Cuenca, utilizando datos crowdsourcing de la aplicación Strava METRO, algoritmos de minería de datos y técnicas de visualización, con la finalidad de brindar una metodología que permita construir conocimiento sobre la movilidad no motorizada en bicicleta.

## II. METODOLOGÍA

La metodología utilizada en este artículo se basa en el enfoque de análisis exploratorio de datos espaciales (ESDA) para detectar e interpretar patrones de movimiento a fin de entender el comportamiento espacial de los usuarios de la bicicleta en el área urbana de Cuenca. El enfoque metodológico consistió en tres fases principales: La primera, la extracción y preprocesamiento de datos crowdsourcing de las trayectorias de ciclistas de la zona urbana de Cuenca. La segunda, la aplicación del algoritmo BIDE para extraer los patrones secuenciales generalizados (GSPs) de movimiento que representan rutas frecuentes de los lugares por los que los ciclistas cruzan durante sus viajes. Finalmente, el análisis de las propiedades principales de los patrones extraídos: tamaño, soporte, localización y relación con variables socioeconómicas.

### A. EXTRACCIÓN Y PREPROCESAMIENTO DE DATOS CROWDSOURCING

Strava METRO es un servicio de datos que ofrece información geográfica, temporal y descriptiva del movimiento de ciclistas y peatones de un área geográfica específica, compatible con diferentes ambientes de Sistemas de Información Geográfica (SIG) (Strava, 2015). La información fue recolectada por usuarios de la aplicación Strava, en teléfonos móviles inteligentes que permite monitorear las trayectorias a pie o en bicicleta. Los datos recolectados son pre-procesados, agregados y anonimizados por el proveedor de datos y ofertados como información para la planificación urbana. Se adquirió un conjunto de datos para la ciudad de Cuenca para el período Agosto 2014 - Julio 2015. El conjunto de datos consiste en tres productos principales: a) Streets, representa datos agregados de un minuto por cada Edge en una red de calles obtenidas de OpenStreetMap; b) Nodes, similares a los Edges pero agregados por intersección de calles con información acerca del tiempo de espera, y c) Origen/Destino (OD) el cual se deriva de las Streets y de los reportes de origen y destino, así como las localidades intermedias de cada viaje. Estas localidades son agregadas dentro de sectores censales para preservar el anonimato de los usuarios y para luego comparar con datos socioeconómicos. El análisis descrito en este artículo se enfoca en el producto OD, del cual extrajimos las secuencias correspondientes a la ciudad de Cuenca, para aplicar un análisis exploratorio de los viajes en bicicleta que inician en la zona urbana.

Debido al potencial sesgo socioeconómico de estos datos, analizamos la correlación de la frecuencia de orígenes de viajes con el estatus socioeconómico. Para esto se calculó para cada sector censal el Índice de Condiciones de Vida (ICV), el cual resume las condiciones de vida de la población y su estatus socioeconómico (Orellana & Osorio, 2014).

Todos los datos fueron procesados en R (R project, 2015) y QGIS (QGIS, 2017).

## B. EXTRACCIÓN DE PATRONES SECUENCIALES GENERALIZADOS

Los patrones secuenciales generalizados (GSPs) pueden ser definidos como frecuencias de secuencias generalizadas que pueden ser encontradas en conjuntos de eventos ordenados temporalmente (Agrawal & Srikant, 1995). La palabra generalizado implica, por un lado, que los eventos ocurrieron en un orden relativo más que en uno absoluto, y por otro lado, que la detección de secuencias frecuentes podría tener eventos intermedios presentes únicamente en algunas de las secuencias originales. Un ejemplo ilustrativo de GSP es representado en la Figura 1. A la izquierda se encuentran 5 secuencias de números (s1...s5). A la derecha, cuatro GSPs fueron detectados. La secuencia generalizada más común (GSP1: 5, 6) se encuentra en todas las secuencias originales, mientras que en la segunda (GSP2: 5, 6, 1) se encuentra en cuatro de las cinco secuencias originales. El valor de soporte de un GSP indica la razón entre el número de secuencias en la que el GSP es encontrado y el número total de secuencias del conjunto de datos.

s1: 1,2,3,5,6,3,1	GSP1: 5,6 (support = 1)
s2: 1,2,4,5,6,1	GSP2: 5,6,1 (support = 0.8)
s3: 1,5,6,7,9	GSP3: 1,5,6 (support = 0.6)
s4: 2,5,3,6,1	GSP4: 2,5,6 (support = 0.6)
s5: 4,5,6,1	

Figura 1. Ejemplo de patrones secuenciales generalizados extraídos de un conjunto de secuencias de eventos.

En nuestro caso, cada secuencia es un viaje en bicicleta con todos los sectores censales, y en el orden en el que estos fueron recorridos. Por lo tanto, la misión de este análisis es encontrar rutas frecuentes seguidas por los ciclistas. La interpretación del ejemplo provisto en la Figura 1. en términos de comportamiento espacial es que todos los viajes fueron del sector censal 5 al sector censal 6, a pesar del lugar en el que estuvieron antes, después o en la mitad de estos tramos. Analizar los GPSs en lugar de las secuencias originales nos permite un mejor exploración y entendimiento del comportamiento de la movilidad colectiva.

Los GSPs fueron extraídos usando el algoritmo BIDE+, implementado en *Sequential Pattern Mining Framework* (SPMF) (Fournier-Viger et al. 2016). La ventaja del algoritmo BIDE+ es que evita la redundancia al extraer solo los patrones secuenciales "cerrados", i.e. secuencias que no están contenidas en otras secuencias que tiene el mismo valor de soporte. Un patrón cerrado produce una clase equivalente de patrones que comparten el mismo cierre, y aquellos patrones están parcialmente ordenados, es decir, de acuerdo a la relación de inclusión. Los elementos más pequeños en la clase equivalente son llamados generadores mínimos, y el único elemento máximo es llamado patrón cerrado (Fournier-Viger et al., 2008). Los GSPs cerrados, fueron extraídos con un valor mínimo de soporte igual a 0.14 (es decir, que aparece en al menos el catorce por ciento de los viajes). Los GPSs resultantes fueron exportados a un archivo separado por comas para un mayor análisis.

## C. EXPLORACIÓN Y VISUALIZACIÓN DE LOS GSPS

Con el fin de interpretar los GSPs y obtener conocimiento sobre el comportamiento de la movilidad colectiva de los usuarios de bicicleta en la zona urbana de Cuenca, los patrones extraídos fueron analizados de acuerdo a sus propiedades intrínsecas: tamaño, soporte y frecuencia. Finalmente, los GPSs y sus propiedades destacadas fueron representadas usando la técnica de visualización *Flow maps*, que representan mo-

vimientos colectivos entre localidades, y son especialmente adecuado para visualizar patrones de movimientos secuenciales generalizados (Orellana et al., 2012).

## III. RESULTADOS

Del conjunto de datos, filtramos los viajes en bicicleta que inician únicamente en los sectores censales de la zona urbana de Cuenca, sin distinción del tipo de viaje. Obtuvimos 4939 secuencias (viajes), cuyas trayectorias se componen de 3 a 429 localidades; es decir, existen viajes en los que un ciclista cruza por 429 sectores censales. Se identificó que, a pesar que los viajes inician en la zona urbana, muchos de ellos realizan parte de su trayectoria, por la zona periurbana de Cuenca. Como se puede observar en la Figura 2, al visualizar en conjunto los viajes registrados, su análisis se dificulta, razón por lo cual fue necesario aplicar las técnicas de minería de datos para extraer información útil.

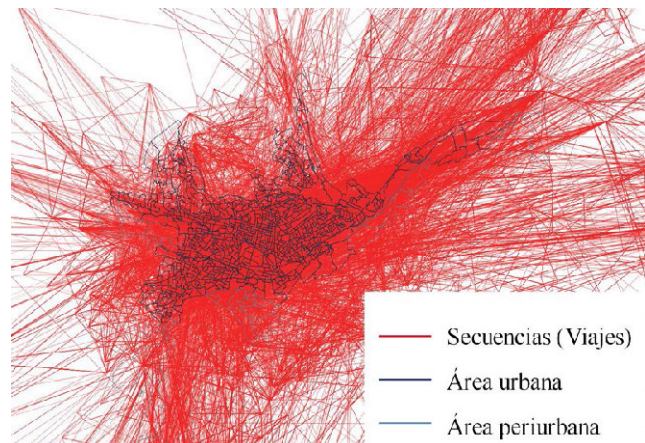


Figura 2. Mapa de viajes en bicicleta originados en la zona urbana de Cuenca y registrados por la aplicación móvil Strava.

En cuanto a la relación entre la frecuencia de origen de viajes y el Índice de Condiciones de Vida (ICV) en los sectores censales, se evidenció una correlación positiva leve pero estadísticamente significativa, lo cual confirmaría el sesgo socioeconómico del conjunto de datos (Figura 3). Los sectores con mayores condiciones de vida son también aquellas donde se originan el mayor número de viajes (Figura 4).

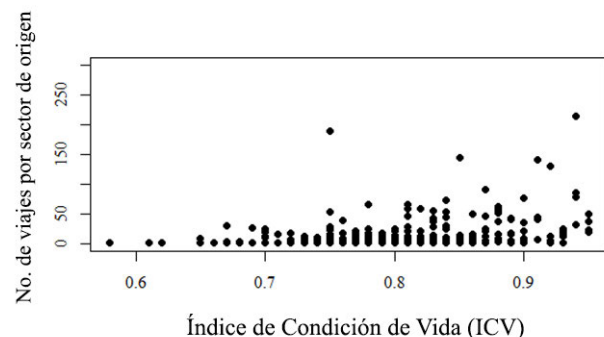


Figura 3. Relación entre la frecuencia de los sectores origen y su ICV ( $r = 0,31$ ,  $p$ -valor  $< 0.0001$ ).

El algoritmo BIDE+ extrajo 1365 patrones secuenciales generalizados (GSP) con un soporte mínimo de 0.10. (Figura 5), caracterizados por tener un tamaño de 8 localidades (Figura 6), y un valor de soporte inferior a 0,3 (Figura 7). En el mapa de

flujos, se evidencia que los GSPs se ubican al noreste (Sectores de Monay, Capulisipamba, Challuabamba,) y al sur (Sectores de El Ejido y Control Sur) de la zona urbana de Cuenca, extendiéndose hacia algunos sectores de su periferia. En relación a los patrones de movimiento de origen y destino, se identificó 316 rutas compuestas por dos localidades (correspondientes al origen y destino), de las cuales las más frecuentes también se concentran en la zona noreste de la ciudad, y se direccionan al norte y sur, y hacia sectores externos al límite urbano (Figura 8).

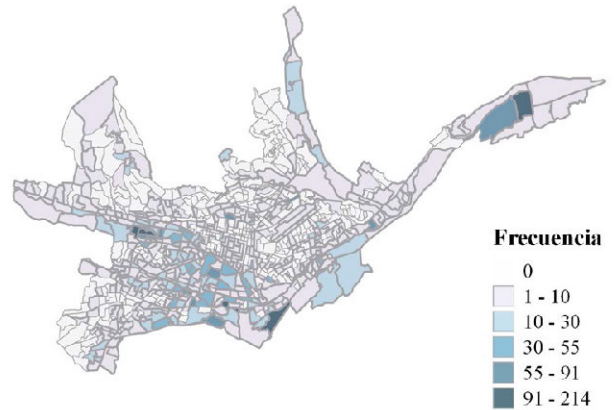


Figura 4. Mapa de los sectores de Cuenca donde se inician los viajes en bicicleta

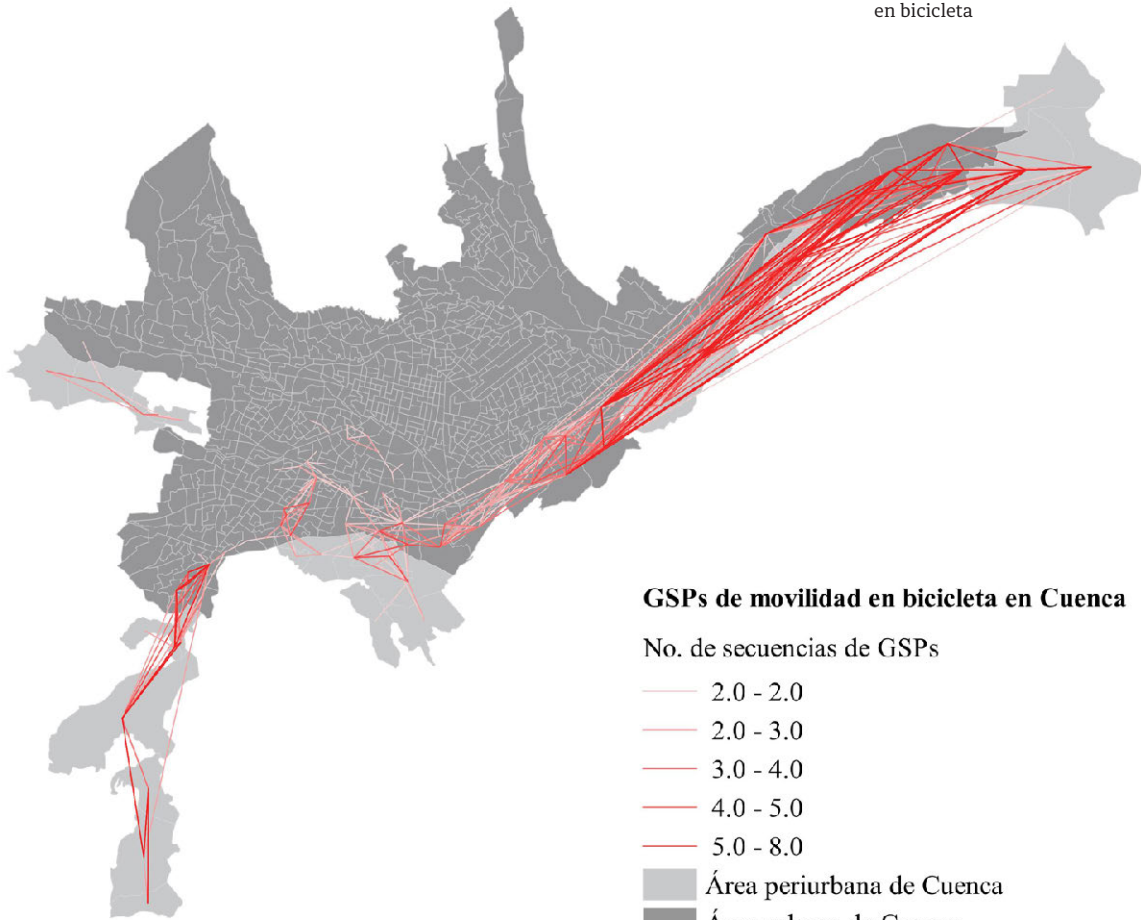


Figura 5. Mapa de Patrones Secuenciales Generalizados de la movilidad en bicicleta en Cuenca.

**GSPs de movilidad en bicicleta en Cuenca**

No. de secuencias de GSPs

- 2.0 - 2.0
- 2.0 - 3.0
- 3.0 - 4.0
- 4.0 - 5.0
- 5.0 - 8.0
- Área periurbana de Cuenca
- Área urbana de Cuenca

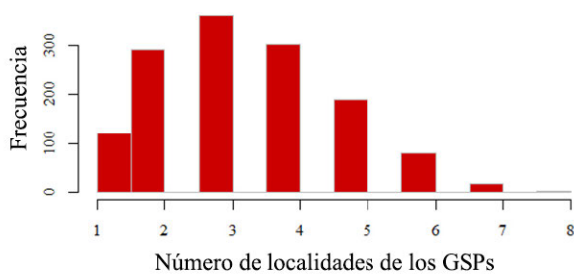


Figura 6. Número de localidades de los Patrones Secuenciales Generalizados y su frecuencia

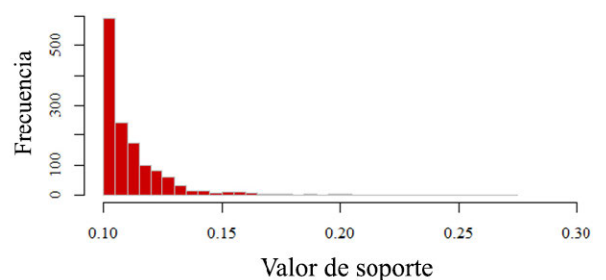


Figura 7. Frecuencia del valor de soporte de los Patrones Secuenciales Generalizados.

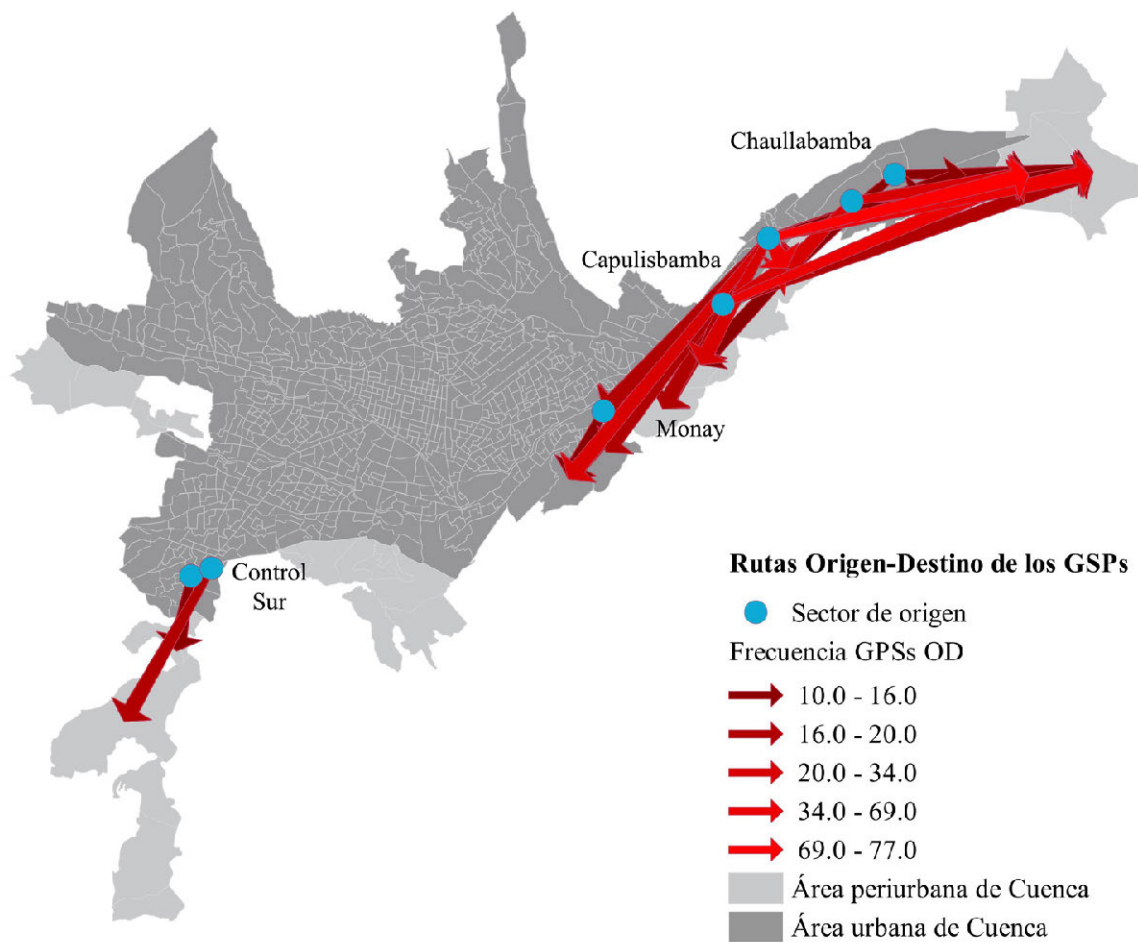


Figura 8. Rutas origen-destino más frecuentes identificadas en los patrones secuenciales generalizados de la movilidad en bicicleta en Cuenca.

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo presentamos una metodología para detectar patrones secuenciales generalizados de movilidad de ciclistas a partir de datos crowdsourcing. La extracción y pre-procesamiento de estos datos produjo información descriptiva de la movilidad en bicicleta, tal como el número de viajes en la zona urbana de Cuenca que se han registrado en la aplicación Strava durante el periodo de un año, y el tamaño de los trayectos de acuerdo al número de sectores censales que han cruzado en cada viaje. Al explorar la relación del ICV de los sectores censales con el número de actividades en bicicleta hemos encontrado una correlación estadísticamente significativa, lo cual confirmaría un sesgo socioeconómico en los datos que se debe tener en cuenta para la interpretación de los patrones. Aún así, los patrones detectados en los datos de Strava podrían ser indicadores de la cantidad de actividad ciclística en general (Jestico et al., 2016).

Por otro lado, los patrones secuenciales generalizados (GSPs) detectados, describen aspectos comunes de las trayectorias registradas por el colectivo de ciclistas en la aplicación Strava. De acuerdo a los valores de soporte, tamaño y frecuencia de los GSPs, las rutas más comunes de la movilidad de ciclistas se caracterizan por ser trayectos cortos, que carecen de

localidades intermedias destacadas. El valor de soporte bajo, también indica que la preferencia de rutas de los ciclistas es diversa.

A diferencia de las rutas descritas por los datos crowdsourcing, los GSPs permiten visualizar y localizar en el área de estudio, las rutas comunes de la movilidad de ciclistas, lo que ofrece un acercamiento a las zonas urbanas de Cuenca claves para la planificación de infraestructura para la movilidad no motorizada en bicicleta. La metodología presentada permite obtener insumos relevantes del comportamiento espacial de los ciclistas en base a datos crowdsourcing, minería de datos y visualización, la cual es aplicable a conjuntos de datos provenientes de diferentes fuentes de recolección de información georeferenciada. Para aprovechar el potencial de esta metodología, y generar conocimiento sobre el comportamiento espacial colectivo de los ciclistas de una población específica, es necesario orientar esfuerzos para generar información georeferenciada de aquellos ciclistas que no tienen acceso a tecnologías móviles. En cuanto al sesgo que representan los datos de Strava, es importante profundizar en el estudio de los perfiles de usuarios potenciales de bicicleta en un contexto específico, para relacionar y definir el papel que cumplen los usuarios de Strava en ese contexto y el conocimiento que aportan al mismo.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es parte del proyecto “Pies y Pedales, estudio de los patrones de movilidad de ciclistas y peatones para la movilidad sustentable”, financiado por la Dirección de Investigación DIUC de la Universidad de Cuenca. Los autores desean agradecer a los miembros del grupo de investigación LlactaLAB - Ciudades Sustentables del Departamento de Espacio y Población de la Universidad de Cuenca por su contribución.

## REFERENCIAS

- Agrawal, R., & Srikant, R. (1995). Mining sequential patterns (pp. 3-14).
- BID. (n.d.). Cuenca, Ciudad Sostenible / Plan de Acción. Retrieved from <https://dl.dropboxusercontent.com/u/13114503/Cuenca%20Ciudad%20Sostenible.pdf>
- Colectivo Cuenca Ciudad para Vivir. (n.d.). Retrieved May 31, 2017, from [http://www.cccv.ec/download/20170316\\_EncuestaCCCV2016\(Sitio\).pdf](http://www.cccv.ec/download/20170316_EncuestaCCCV2016(Sitio).pdf)
- Fishman, E. (2016). Cyclist as transport. *Transports Reviews*, 36(1), 1-8.
- Fournier-Viger, P., Lin, J. C.-W., Gomariz, A., Gueniche, T., Soltani, A., Deng, Z., & Lam, H. T. (2016). The SPMF Open-Source Data Mining Library Version 2. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 36-40).
- GAD Municipal, del C. C. (2015). Plan de Movilidad y Espacios Públicos: Plan Operativo de Bicicletas.
- Geng, L., & Hamilton, H. J. (2006). Interestingness measures for data mining. *ACM Computing Surveys*, 38(3), 9-es.
- Griffin, G. P., & Jiao, J. (2015). Where does bicycling for health happen? Analysing volunteered geographic information through place and plexus. *Journal of Transport & Health*, 2(2), 238-247.
- Handy, S., van Wee, B., & Kroesen, M. (2014). Promoting Cycling for Transport: Research Needs and Challenges. *Transport Reviews*, 34(1), 4-24.
- Heesch, K. C., & Langdon, M. (2016). The usefulness of GPS bicycle tracking data for evaluating the impact of infrastructure change on cycling behaviour. *Health Promotion Journal of Australia: Official Journal of Australian Association of Health Promotion Professionals*. <https://doi.org/10.1071/HE16032>
- Iacono, M., Krizek, K. J., & El-Geneidy, A. (2010). Measuring non-motorized accessibility: issues, alternatives, and execution. *Journal of Transport Geography*, 18(1), 133-140.
- Jestico, B., Nelson, T., & Winters, M. (2016). Mapping ridership using crowdsourced cycling data. *Journal of Transport Geography*, 52, 90-97.
- Orellana, D., Bregt, A. K., Ligtenberg, A., & Wachowicz, M. (2012/6). Exploring visitor movement patterns in natural recreational areas. *Tourism Management*, 33(3), 672-682.
- Orellana, D., & Osorio, P. (2014). Segregación socio-espacial urbana en Cuenca, Ecuador. *Analitika*, 8(2), 27-38.
- Pucher, J., Dill, J., & Handy, S. (2010). Infrastructure, programs, and policies to increase bicycling: an international review. *Preventive Medicine*, 50 Suppl 1, S106-25.
- Romanillos, G., Austwick, M. Z., Ettema, D., & De Kruijff, J. (2015). Big Data and Cycling. *Transport Reviews*, 36(1), 114-133.
- Selala, M. K., & Musakwa, W. (2016). The Potential of Strava Data to Contribute in Non-Motorised Transport (NMT) Planning in Johannesburg. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B2, 587-594.
- Sims R., R. Schaeffer, F. Creutzig, X. Cruz-Núñez, M. D'Agosto, D. Dimitriu, M.J. Figueroa Meza, L. Fulton, S. Kobayashi, O. Lah, A. McKinnon, P. Newman, M. Ouyang, J.J. Schauer, D. Sperling, and G. Tiwari. (2014). Transport. In *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- Slimani, T., & Lazzez, A. (2013, November 2). Sequential Mining: Patterns and Algorithms Analysis. *arXiv [cs.DB]*. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1311.0350>
- Strava. (2015). Strava METRO. Comprehensive User Guide (Version Version 2.0 for 2015). Retrieved from [http://ubdc.ac.uk/media/1323/stravametro\\_200\\_user\\_guide\\_withoutpics.pdf](http://ubdc.ac.uk/media/1323/stravametro_200_user_guide_withoutpics.pdf)
- Wang, J., & Han, J. (2004). BIDE: efficient mining of frequent closed sequences. In *Proceedings. 20th International Conference on Data Engineering* (pp. 79-90).
- Zheng, Y. (2015). Trajectory Data Mining: An Overview. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology (TIST)*, 6(3), 29.





# El análisis de umbral como identificador de patrones delictuales en varios niveles geográficos del cantón Cuenca, Ecuador año 2013 al 2016

Velastegui Casco Edy Samuel

Viracochabamba 2-91/  
Azuay/Ecuador  
Samuv23@hotmail.com

## RESUMEN

El objetivo del Análisis de Umbral es una técnica estadística que identifica delitos y áreas geográficas que han “cruzado el umbral” de actividad normal a excepcional en el cantón Cuenca, Ecuador. Este tipo de análisis funciona mediante la realización de dos preguntas simples (Bruce, 2012): ¿Cuál es el volumen normal o esperado para este tipo de delito, en esta área o en este periodo de tiempo? Y ¿Cómo se compara la actividad actual con la que es normal?; Luego el grado de desviación ayuda a que el analista clasifique sus análisis si los delitos o incidentes con violencia son inusualmente muchos en la zona de estudio. El análisis observa con mayor detención cada uno de los incidentes para encontrar si los patrones han emergido. El análisis de umbral, es capaz de observar varios niveles geográficos, desde una pequeña área hasta toda una jurisdicción, según Bruce (2012), el análisis de umbral requiere de bases de datos históricas precisas de por lo menos tres años para cada tipo de delito o incidente del cual se pretende hacer cálculos, sin embargo este tipo de análisis es más preciso si se utiliza un conjunto de datos de cinco a siete años anteriores. Mediante el análisis de umbral se identifica en el cantón Cuenca, Ecuador que la parroquia Hermano Miguel y El Valle presenta una significancia estadística donde los incidentes se han incrementado año a año en un 200% con un valor Z de 2,31; quiere decir que este tipo de incidente es “caluroso”, en la mayoría de casos, algún factor externo influye en la categoría, a menudo un patrón o una serie que ocurra en el área. Estas categorías deben tener mayor atención para una mejor investigación y análisis.

Palabras clave: **Media, Desviación estándar, Valor Z, Análisis de umbral y Coeficiente de variación.**

## ABSTRACT

*The objective of Threshold Analysis is a statistical technique that identifies crimes and geographical areas that have “crossed the threshold” of normal to exceptional activity, which for this study will be applied for the city of Cuenca, Ecuador. This type of analysis works by asking two simple questions (Bruce, 2012): What is the normal or expected volume for this type of crime, in this area or in this period of time? And how current activity compares with normal activity? Therefore, the degree of deviation helps the analyst classify his analyzes if crimes or incidents with violence are unusually increased in the area of*

*study. The analysis looks more closely at each of the incidents to find out if patterns have emerged. Threshold analysis is able to observe several geographic levels, from a small area to an entire jurisdiction. According to Bruce (2012), the threshold analysis requires accurate historical databases of at least three years for each type of crime or incident for which calculations are intended, but this type of analysis is more accurate if the dataset used belongs to the last five to seven years. By means of threshold analysis, it is identified that in Cuenca - Hermano Miguel and El Valle parishes - have a statistical significance where incidents have increased year by year by 200% with a Z value of 2.31; this means that this type of incident is "hot". In most cases, some external factor influences the category, often a pattern or series occurring in the area. These categories should be given greater attention for better research and analysis.*

*Keywords: Mean, Standard deviation, Z-value, Threshold analysis and Coefficient of variation.*

## I. INTRODUCCIÓN

El análisis delictual es una actividad decisiva para el éxito de las estrategias de reducción del delito. La Fundación Paz Ciudadana y Asociación Internacional de Análisis Delictuales IACA (2010), mencionan que la experiencia de países anglosajones, donde la policía y la comunidad universitaria han logrado fructíferas alianzas de las políticas de prevención del delito y del diseño de modelos de gestión de información y conocimiento en las organizaciones evaluación de programas e investigaciones de seguridad pública. Sin embargo en América Latina se trata de una función poco conocida y escasamente descrita, lo que explica en parte que las instancias de entrenamiento no sean frecuentes y que se trate de una labor casi exclusiva de la policía y en ellas sea una materia conocida sólo por algunos.

La Fundación Paz Ciudadana (2012), manifiesta que mejorar el análisis delictual es una necesidad en muchos países e instituciones de prevención y persecución penal en América Latina, tomando como una labor decisiva para tener éxito de las estrategias para la reducción del delito, el análisis delictual implica lograr conjugar factores organizacionales, individuales y situacionales. Innovando una clara voluntad institucional, con un plan maestro de gestión y desarrollo, con procesos de aprendizaje y mejoramiento de la tecnología en las organizaciones, para conseguir resultados positivos.

El "análisis de umbral" es un texto inédito (Bruce 2012), el describe como mediante una técnica estadística y el empleo de un software simple se puede llegar a detectar cuando está ocurriendo delitos e incidentes fuera de la norma o del comportamiento observado en el pasado. Es una técnica tremendamente útil que ayuda a detectar cambios emergentes; en otras palabras, ayuda a estar alerta, además ayuda a estandarizar una tarea que contribuye, como ocurre en el caso anterior, a que la labor del analista pase a ser más relevante aun, asumiendo la labor de anticipar o advertir y dejando de ser solamente un recolector o procesador de datos de sucesos ocurridos en el pasado. Nuevamente, la proactividad se vincula al análisis delictual eficaz potenciado a la organización responsable de prevenir los delitos y problemas de inseguridad.

Cristopher W. Bruce (2012), manifiesta que desde que se inició del análisis delictual, los analistas delictuales tácticos han buscado formas más rápidas y más eficientes para identificar series y patrones emergentes. El método más confiable, la revisión de cada delito y la comparación con una base de datos de delitos anteriores, es esencialmente imposible para los analistas de instituciones grandes o que cuentan con poco personal de seguridad. En vez de eso, se basan en métodos automáticos para examinar datos o disminuir potenciales patrones.

Mediante este análisis se aplica para determinar la concentración de los delitos en el cantón Cuenca desde el año 2013

al 2016 para saber los sectores o parroquias que tienen un comportamiento significativo, para ayudar a las instituciones pertinentes en el área de seguridad, mediante el Boletín Cuenca en Cifras 2016 que elabora el Centro de Estudios Estratégicos del Consejo de Seguridad Ciudadana del cantón Cuenca, donde se aplica esta técnica estadística. Para determinar el comportamiento o concentración de mayor conflictividad.

## II. MÉTODO

El proceso metodológico empieza con la recopilación de los datos, donde mediante el escaneo de los expedientes judicializados de la Fiscalía Provincial del Azuay, luego se realiza la crítica y codificación de las variables de los expedientes y se los digita en una base de datos que pasa a la etapa de revisión y validación de las bases de datos, luego se realiza la georeferenciación de la información desde el nivel de parroquias, áreas urbana, rural, distritos y circuitos de acuerdo a la competencia cantonal, luego pasa a la etapa de consolidación de la base de datos.

Para el análisis cuantitativo se aplica "El Análisis de Umbral", que es una técnica estadística que identifica delitos y áreas geográficas que han "cruzado el umbral" de actividad normal a excepcional. Este tipo de análisis funciona mediante la realización de dos preguntas simples (Bruce, 2012):

- ¿Cuál es el volumen normal o esperado para este tipo de delito, en esta área o en este periodo de tiempo?
- ¿Cómo se compara la actividad actual con la que es normal?

Luego el grado de desviación ayuda a que el analista clasifique sus análisis. Si los delitos o incidentes con violencia son inusualmente muchos en la zona de estudio. El análisis observa con mayor detención cada uno de los incidentes para encontrar si los patrones han emergido.

El análisis de umbral, es capaz de observar varios niveles geográficos, desde una pequeña área hasta toda una jurisdicción.

Según Bruce (2012), el análisis de umbral requiere de bases de datos históricas precisas de por lo menos tres años para cada tipo de delito o incidente del cual se pretende hacer cálculos, por lo que es recomendable, un conjunto de datos de cinco a siete años anteriores.

### ¿QUÉ ES NORMAL?

El análisis de umbral comienza calculando una cantidad "normal" o "esperada" para cada tipo de incidente durante un periodo de tiempo establecido por el analista (Bruce, 2012). Generalmente, esto se logra aplicando un promedio de los datos correspondientes a los tres años anteriores (2013-2015).

A continuación se explican los principales parámetros utilizados para la realización de este análisis.

PROMEDIO O MEDIA PARA LOS DELITOS O INCIDENTES:

Es la suma de los valores dividida para el número total de estos (n).

$$\mu = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \tag{1}$$

Donde  $\mu$  es la media de ocurrencia de los delitos o incidentes en el periodo de análisis;  $x_j$  el número de delitos o incidentes ocurridos en cada año y n son el número total de años de análisis.

Además de la media, necesitamos saber la cantidad normal de desviación de esta media durante cierto lapso de años. Esto se determina mediante la Desviación Estándar de la media que nos indica cuanto se desvía usualmente cada puntaje de la media.

DESVIACIÓN ESTÁNDAR PARA LOS DELITOS O INCIDENTES:

Se define como la raíz cuadrada, de la diferencia, la cual es la suma de los cuadrados de cada valor menos la media, dividida por n (Bruce, 2012).

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \mu)^2}{n}} \tag{2}$$

Donde  $\sigma$  es la desviación estándar de los delitos o incidentes ocurridos en el periodo de análisis;  $x_j$  el número de delitos o incidentes ocurridos en cada año,  $\mu$  es la media de ocurrencia de los delitos o incidentes en el periodo de análisis y n son el número total de años de análisis.

COEFICIENTE DE VARIACIÓN PARA LOS DELITOS O INCIDENTES:

También es importante calcular el Coeficiente de Variación (C.V.), el cual se obtiene dividiendo la desviación estándar para la media.

El coeficiente de variación más bajo es cero (si todos los valores son idénticos). No existe un máximo absoluto; pero en la práctica es poco común encontrar un C.V. mayor a uno.

**Un C.V. con valor cerca de cero (0)** indica muy poca diferencia entre los datos. Podría significar que el tipo de incidente tiene cantidades pequeñas y que es bastante predecible.

**Un C.V. con valor cerca de uno (1)** indica una variedad significativa estadística en el tipo de incidente de año a año, lo que lo hace muy impredecible.

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \tag{3}$$

Donde el CV es el coeficiente de variación que determina el nivel de variación del comportamiento de los delitos e incidentes de año a año,  $\sigma$  es la desviación estándar de los delitos o incidentes ocurridos en el periodo de análisis y  $\mu$  es la media de ocurrencia de los delitos o incidentes en el periodo de análisis.

PORCENTAJE DE CAMBIO PARA LOS DELITOS O INCIDENTES:

Es la diferencia entre el año actual y el promedio, dividido por el promedio.

$$Cambio = \frac{x_j - \mu}{\mu} * 100\% \tag{4}$$

Donde el *Cambio* es el porcentaje de variación del comportamiento de los delitos e incidentes del año actual con el prome-

dio de los años anteriores y  $\mu$  es la media de ocurrencia de los delitos o incidentes en el periodo de análisis.

El problema del porcentaje de cambio es que no justifica la cantidad normal de fluctuación en la categoría del incidente analizado, la cual previamente hemos medido por medio de la desviación estándar. El porcentaje de cambio considera la diferencia en términos del promedio; pero lo que en realidad necesitamos es una estadística que considere la diferencia en términos de promedio y desviación estándar. Aquí es donde aparece el puntaje estándar (también llamado puntaje o valor z).

PUNTAJE O VALOR ESTÁNDAR (Z) PARA DELITOS O INCIDENTES:

El puntaje o valor estándar nos dice cuán lejos del promedio se encuentra un valor individual (por ejemplo del año en curso). Para propósitos del análisis del umbral, el puntaje estándar es la diferencia entre el año actual y el promedio, dividido por la desviación estándar (Bruce, 2012).

$$Z = \frac{x_j - \mu}{\sigma} \tag{5}$$

Donde el calor Z es el indicador que nos permite determinar si los delitos o incidentes han cruzado el umbral en determinadas áreas geográficas,  $x_j$  el número de delitos o incidentes ocurridos en cada año,  $\mu$  es la media de ocurrencia de los delitos o incidentes en el periodo de análisis y  $\sigma$  es la desviación estándar de los delitos o incidentes ocurridos en el periodo de análisis.

Los puntajes o valores estándar funcionan en una escala que va de negativa a positiva. No existe un valor absoluto máximo ni mínimo para la escala; no obstante, la mayoría de los valores se encuentran entre -1 y 1 y casi todos estarán entre -2 y 2. Valores mayores o menores se vuelven cada vez menos comunes.

Por lo general, se puede interpretar los puntajes estándar como se muestra a continuación:

**TABLA I**

Colores y escalas para el análisis de los delitos e incidentes ocurridos en determinada área geográficas del cantón Cuenca según el valor Z ponderado.

Color	Escala	Valor Z
	Frío	Bajo - 2
	Normal	-1 a 1
	Fresco	-1 a -2
	Templado	1 a 2
	Caluroso	Sobre 2

Para la Interpretación de puntaje o valor estándar Z:

- Bajo -2: El tipo de incidente es “frío”, Significativamente Bajo lo Normal. Se debe investigar qué factores pueden causar que este incidente esté disminuyendo, así se puede aplicar este logro en otro periodo de tiempo, otras áreas u otros delitos.
- -1 a -2: El tipo de incidente es “fresco”, Algún factor puede estar influyendo en que baje, o quizá sea sólo una fluctuación aleatoria.
- -1 a 1: El tipo de incidente es “normal”, Esta dentro del rango que esperaríamos para esta categoría.
- 1 a 2: El tipo de incidente es “templado”, Un poco más de lo normal. Hay que poner un poco más de atención.

- Sobre 2: El tipo de incidente es “caluroso”, En la mayoría de casos, algún factor externo influye en la categoría, a menudo un patrón o una serie que ocurra en el área. Estas categorías deben tener mayor atención para una mejor investigación y análisis. Observar Figura 1.

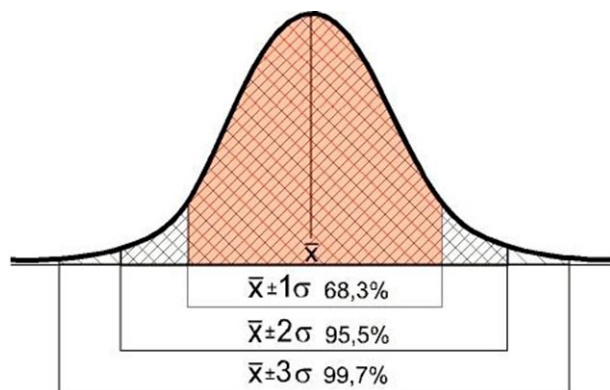


Figura 1. Campana de Gauss, donde se muestra los valores Z.

La teoría detrás del uso del puntaje estándar se basa en una distribución normal (representada por la campana de Gauss). El uso del puntaje estándar en esta instancia no es poner a prueba la significancia estadística, sin priorizar nuestro centro de atención.

Como ejemplo podemos referirnos a la TABLA V, que muestra que los homicidios y asesinatos cometidos con arma blanca han disminuido en un 8%, lo cual no suena a una reducción muy grande. Sin embargo, debido a que la delincuencia usualmente es bastante predecible, rara vez varía de un rango normal de 4-13 (promedio +/- la desviación estándar). El hecho de obtener este porcentaje es en realidad muy importante, lo cual indica el puntaje estándar  $z$  (-0,15), que tiene un comportamiento normal de año a año.

Por otra parte, los asesinatos y homicidios que se han cometido con arma contundente han disminuido en 50% lo que aparentaría ser importante. No obstante, debido a que la delincuencia varía de manera considerable de un año a otro, el puntaje estándar nos dice correctamente que la disminución en el año 2016 no es significativa en términos estadísticos.

El puntaje estándar sirve para definir el “umbral”, en el “análisis de umbral”. Los analistas tendrán que experimentar con los datos presentados. Los puntajes estándar altos son una buena señal de que un patrón, una serie o algún otro fenómeno están influyendo en la categoría (Bruce, 2012).

### III. RESULTADOS

Los resultados que se han sido analizados mediante la metodología mencionada en el cantón Cuenca a nivel de parroquia, a continuación se muestra:

Los hallazgos presentados se lo realizaron para los Delitos contra la vida registrados en los años 2013, 2014, 2015 y 2016.

Los resultados del análisis de umbral enfocado en delitos contra la vida y registrados en el año 2016 representan el 63% en las parroquias urbanas. (TABLA II). En el período 2013-2016, el 17% de delitos contra la vida en promedio se registró en la parroquia El Vecino.

De acuerdo al análisis de umbral (valor Z), en las parroquias: Monay, San Blas, San Sebastián y Yanuncay existe una disminución estadística significativa leve (fresco) de 100% en

cada una en el año 2016 con respecto a los años anteriores; esto quiere decir que en las parroquias El Vecino, El Batán, Bellavista, El Sagrario, Gil Ramírez Dávalos y Totoracocha se presenta un incremento del 0% al 50% respectivamente y una disminución del 25% en la parroquia Sucre, lo cual estadísticamente no es significativo, mostrando un comportamiento normal a través del tiempo. En la parroquia Huayna Cápac observamos una disminución estadística significativa alta (frío) del 100%. En la parroquia Hermano Miguel existió un incremento del 200% en el año 2016 con respecto a los demás años, lo que significa un incremento estadístico significativo alto (caluroso) e indica la presencia de un factor externo de consideración en el año 2016.

Sin embargo los delitos contra la vida a nivel urbano muestran una disminución del 38%. Esta disminución es estadísticamente significativa leve (fresco), lo que quiere decir que existe algún factor que esté influyendo en la baja o solamente es una fluctuación aleatoria en el año 2016 con respecto a los demás años.

**TABLA II**  
CANTÓN CUENCA: DELITOS CONTRA VIDA POR PERÍODO SEGÚN PARROQUIA URBANA (2013-2016).

Parroquia Urbana	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Prom.	Desv. Est.	C.V.	Año 2016	Cambio	Z	Escala
El Vecino	0	5	4	3,00	2,65	0,9	3	0%	0,03	normal
El Batán	4	0	0	1,33	2,31	1,7	2	50%	0,29	normal
Hermano Miguel	1	1	0	0,67	0,68	0,9	2	200%	2,31	caluroso
Machángara	0	2	1	1,00	1,00	1,0	2	100%	1,00	normal
Sucre	1	2	1	1,33	0,68	0,4	2	50%	1,15	templado
Bellavista	0	1	1	0,67	0,68	0,9	1	50%	0,58	normal
El Sagrario	0	2	0	0,67	1,15	1,7	1	50%	0,29	normal
Gil Ramírez Dávalos	2	1	0	1,00	1,00	1,0	1	0%	0,03	normal
Huayna Cápac	2	1	3	2,00	1,00	0,5	1	-50%	-1,00	normal
Monay	0	2	2	1,33	1,16	0,9	1	25%	-0,26	normal
Totoracocha	1	1	0	0,67	0,68	0,9	1	50%	0,58	normal
Yanuncay	3	4	1	2,67	1,53	0,6	1	-63%	-1,09	fresco
Canaribamba	1	0	0	0,33	0,68	1,7	0	-100%	-0,98	normal
San Blas	0	1	1	0,67	0,68	0,9	0	-100%	-1,10	fresco
San Sebastián	4	3	2	3,00	1,00	0,3	0	-100%	-3,00	frío
Total*	15	26	16	20,33	5,13	0,3	18	-11%	-0,45	normal

\*Incluye únicamente los casos que cuentan con información de la parroquia donde se registró el delito.  
Fuente: Fiscalía Provincial del Azuay  
Datos sujetos a variación

Los resultados del análisis de umbral enfocado en delitos contra la vida y registrados en el año 2016 representan el 48% en las parroquias rurales. (TABLA III). En el período 2013-2016, el 38% de homicidios y asesinatos en promedio se registraron en las parroquias El Vecino, Yanuncay y San Sebastián.

De acuerdo al análisis de umbral (valor Z), en las parroquias: Victoria del Portete existe una disminución estadística significativa leve (fresco) de 100% en el año 2016 con respecto a los años anteriores; Algún factor puede estar influyendo en que baje, o quizá sea sólo una fluctuación aleatoria en esta área geográfica. En las parroquias El Valle y Baños se presenta un incremento del 200% respectivamente en el año 2016 con respecto a los demás años, lo que significa un incremento estadístico significativo alto (caluroso) y moderado (templado) e indica la presencia de un factor externo de consideración en el año 2016, que a menudo un patrón o una serie que ocurra en el área. Estas categorías deben tener mayor atención para una mejor investigación y análisis.

Mientras tanto que en la parroquia de Molleturo muestra una disminución del 100%. Esta disminución es estadísticamente significativa alta (frío), lo que quiere decir que es significativamente bajo lo normal. Se debe investigar qué factores pueden causar que este incidente esté disminuyendo, así se pue-

de aplicar este logro en otro periodo de tiempo, otras áreas u otros delitos, en el año 2016 con respecto a los demás años, mientras que en las demás parroquias el análisis de umbral nos muestra un comportamiento normal en el año 2016 con respecto a los años anteriores, quiere decir que el comportamiento delictual en estas áreas geográficas se mantienen los delitos e incidentes constantes en el tiempo.

**TABLA III**  
CANTÓN CUENCA: DELITOS CONTRA VIDA POR PERÍODO SEGÚN PARROQUIA RURAL (2013-2016).

Parroquia Rural	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Prom.	Desv. Est.	C.V.	Año 2016	Cambio	Z	Escala
El Valle	1	1	0	0,67	0,56	0,9	2	200%	2,31	caluroso
Turi	2	0	1	1,00	1,00	1,0	2	100%	1,00	normal
Bañica	1	0	0	0,33	0,56	1,7	1	200%	1,15	templado
Paocha	0	0	0	0,00	0,00	0,0	1	100%	-	-
Sirincaiy	2	0	1	1,00	1,00	1,0	1	0%	0,00	normal
Chiquitad	1	0	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Laoso	1	0	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Molleturo	1	1	2	1,33	0,56	0,4	0	-100%	-2,31	frío
Nulvi	0	0	1	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Octavo Cercero	1	0	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Quingeo	0	1	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Ricaurte	1	0	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
San Joaquín	2	0	0	0,67	1,16	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Santa Ana	1	0	0	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Sayausí	1	1	1	1,00	0,00	0,0	0	-100%	-	-
Sicayá	0	0	1	0,33	0,56	1,7	0	-100%	-0,58	normal
Victoria del Portete	0	1	1	0,67	0,56	0,9	0	-100%	-1,15	fresco
<b>Total*</b>	<b>15</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>9,33</b>	<b>5,13</b>	<b>0,5</b>	<b>7</b>	<b>-25%</b>	<b>-0,45</b>	<b>normal</b>

\*Incluye únicamente los casos que cuentan con información de la parroquia donde se registró el delito.  
Fuente: Fiscalía Provincial del Azuay.  
Datos sujetos a variación

A continuación el análisis de umbral nos permite identificar las posibles causas que determinan estos tipos de delitos suscitados en el cantón Cuenca.

En promedio el 65% de casos de homicidios y asesinatos suscitados en el año 2016 se encuentran en investigación.

En la TABLA IV se observa que las causas de homicidios y asesinatos en investigación, riñas y violencia intrafamiliar mantienen un comportamiento normal en el tiempo de acuerdo al valor Z. mientras que en las causas de asalto/robo, venganza y problemas pasionales existen una disminución estadística significativa leve (fresco) a través del tiempo. Lo que quiere decir que los casos que más se dieron fueron por las causas de riñas callejeras y violencia intrafamiliar.

**TABLA IV**  
CANTÓN CUENCA: DELITOS CONTRA LA VIDA POR PERÍODO SEGÚN CAUSA DEL SUCESO (2013-2016).

Causa del suceso	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Prom.	Desv. Est.	C.V.	Año 2016	Cambio	Z	Escala
En investigación	18	14	16	16,00	2,00	0,1	17	6%	0,50	normal
Riñas	6	3	2	3,67	2,08	0,6	4	9%	0,16	normal
Violencia intrafamiliar	1	1	0	0,67	0,68	0,9	1	60%	0,38	normal
Asalto/robo	2	1	3	2,00	1,00	0,5	0	-100%	-2,00	fresco
Venganza	2	2	2	2,00	0,00	0,0	0	-100%	-	-
Problema pasional	2	3	0	1,67	1,53	0,9	0	-100%	-1,08	fresco
Otros	6	8	5	6,33	1,53	0,2	4	-37%	-1,53	fresco
<b>Total</b>	<b>37</b>	<b>32</b>	<b>29</b>	<b>32,33</b>	<b>4,51</b>	<b>0,1</b>	<b>26</b>	<b>-20%</b>	<b>-1,40</b>	<b>fresco</b>

\*Incluye únicamente los casos que cuentan con información de la parroquia donde se registró el delito.  
Fuente: Fiscalía Provincial del Azuay.  
Datos sujetos a variación

De la misma manera mediante el análisis de umbral se puede analizar el arma utilizada para el cometimiento de estos delitos donde nos muestra que en promedio el 44% de casos de homicidios y asesinatos suscitados en el periodo 2013-2016 fueron cometidos con arma blanca y arma de fuego.

En la TABLA V se observa que el delito perpetrado con arma de fuego presenta un incremento del 62%, variación que es

estadísticamente es significativa moderada (templada) según el valor Z (análisis de umbral); por el contrario los homicidios y asesinatos a través de ahorcadura presenta una disminución del 100% que es estadísticamente significativo leve (fresco) de acuerdo al valor Z, en el año 2016 con respecto a los años anteriores.

**TABLA V**  
CANTÓN CUENCA: DELITOS CONTRA LA VIDA POR PERÍODO SEGÚN TIPO DE ARMA UTILIZADA (2013-2016)

Armas utilizadas	Año 2013	Año 2014	Año 2015	Prom.	Desv. Est.	C.V.	Año 2016	Cambio	Z	Escala
Arma blanca	13	9	4	8,67	4,51	0,5	8	-8%	-0,15	normal
Arma de fuego	4	6	3	4,33	1,53	0,4	7	62%	1,75	templado
Objeto contundente	4	0	2	2,00	2,00	1,0	1	-50%	-0,50	normal
Estrangulación	2	1	1	1,33	0,58	0,4	1	-25%	-0,58	normal
Ahorcadura	0	2	2	1,33	1,15	0,9	0	-100%	-1,15	fresco
Otras	11	7	8	6,67	2,08	0,2	3	-65%	-2,72	frío
En investigación	3	7	8	6,00	2,65	0,4	6	0%	0,00	normal
<b>Total</b>	<b>37</b>	<b>32</b>	<b>28</b>	<b>32,33</b>	<b>4,51</b>	<b>0,1</b>	<b>26</b>	<b>-20%</b>	<b>-1,40</b>	<b>fresco</b>

\*Incluye únicamente los casos que cuentan con información de la parroquia donde se registró el delito.  
Fuente: Fiscalía Provincial del Azuay.  
Datos sujetos a variación

**IV. CONCLUSIONES**

El análisis de umbral es una técnica estadística multivariante cuantitativa muy útil para identificar patrones delictuales en las áreas geográficas conflictivas en el cantón Cuenca, Ecuador, además permite analizar el comportamiento de las diferentes variables que identifican las posibles causas de los delitos que se incrementan o disminuyen.

Al aplicar el análisis de umbral para determinar la conflictividad estadísticamente en las áreas geográficas del cantón Cuenca, Ecuador, el mismo que muestra que la parroquia urbana Hermano Miguel y parroquia rural El Valle son las áreas donde se registró un comportamiento creciente de este delito a través del tiempo, presentando un incremento significativo estadísticamente del 200% de año a año, lo que quiere decir que el tipo de incidente es “caluroso”, En la mayoría de casos, algún factor externo influye en la categoría, a menudo un patrón o una serie que ocurra en el área. Estas áreas deben tener mayor atención para una mejor investigación y análisis.

En la parroquia urbana Huayna Cápac y parroquia rural Molleturo, el análisis de umbral en estas áreas geográficas identifica una baja estadísticamente significativa del 100%, lo que quiere decir que el tipo de incidente es “frío”, bajo lo normal; se debe investigar qué factores pueden causar que este incidente esté disminuyendo, así se puede aplicar este logro en otro periodo de tiempo, otras áreas u otros delitos. A demás se determina mediante el análisis de umbral que las posibles causas de estos delitos se deben a riñas y violencia intrafamiliar, y que la mayoría de estos delitos fueron cometidos con arma blanca y arma de fuego en un 62%.

Este tipo de análisis permite que se determinen los patrones delictuales o de incidencia en determinadas áreas geográficas, permitiendo profundizar el análisis y llegar a determinar las posibles causas de fondo, para poder dar explicación a la baja o incremento de este tipo de delitos dentro de una jurisdicción, como lo han venido realizando en otros países en Europa y actualmente en América Latina.

## **REFERENCIAS**

Bruce, C. (2012). El análisis de umbral: utilizando estadísticas para Identificar patrones delictuales. En Varela, F. (Ed.). (2012). Análisis delictual: técnicas y metodologías para la reducción del delito. (pp. 88-97). International Association of Crime Analysts y Fundación Paz Ciudadana. Santiago de Chile.

Cuenca en cifras. CEE-SC. (2013, 2104, 2015 y 2016). Boletín Estadístico del Consejo de Seguridad Ciudadana de Cuenca: Análisis estadístico cuantitativo y espacial de delitos y contravenciones ocurridos en el cantón Cuenca. Capítulo I. Delitos contra la Vida. (pp. 11-17). Centro de Estudios Estratégicos del Consejo de Seguridad Ciudadana. Cuenca Ecuador.

# Estimación de la concentración de material particulado menor a 10 micras a través de sensores remotos en el área urbana de la ciudad de Cuenca

Abad Lorena<sup>1</sup>, Mejía Danilo<sup>1,2</sup>

1 Carrera de Ingeniería Ambiental/  
Facultad de Ciencias Químicas/Uni-  
versidad de Cuenca  
12 de Abril s/n y Agustín Cueva/  
Azuay/Ecuador  
lore.abad6@gmail.com

2 Centro de Estudios Ambientales/  
Facultad de Ciencias Químicas/Uni-  
versidad de Cuenca  
Av. Víctor Manuel Albornoz s/n y  
Av. De los Cerezos /Azuay/Ecuador  
danilo.mejia@ucuenca.edu.ec

## RESUMEN

Cuenca presenta alta contaminación atmosférica incluyendo emisiones por material particulado, que afectan a la salud de los pobladores y al desarrollo biótico por su interacción y permanencia en la atmósfera. Se identifica una ecuación empírica para estimar concentraciones de PM<sub>10</sub> a partir de correlaciones entre mediciones terrestres del contaminante con valores derivados de imágenes satelitales Landsat 8. Se genera un modelo de regresión lineal múltiple aplicando la reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) y niveles digitales (DN), con un coeficiente de determinación múltiple R<sup>2</sup> 0.55 y un valor-p de 0.002. Se obtiene un mapa de distribución de PM<sub>10</sub> para estimar concentraciones de este contaminante en sitios sin cobertura de la red de monitoreo de la ciudad. Incluir bandas térmicas en los modelos mejora notablemente el coeficiente de determinación. Sin embargo, existen zonas donde los valores estimados de PM<sub>10</sub> superan los rangos promedio, recomendando una validación in situ.

Palabras clave: **calidad del aire, contaminación urbana, material particulado, PM<sub>10</sub>, sensores remotos, Landsat 8.**

## ABSTRACT

*Cuenca city presents high atmospheric pollution values due to traffic, industrial activity, and urban expansion, among other factors. Within the city main pollutants, particulate matter affects the citizen's health and biotic development due to their atmospheric interaction and permanence. The aim of the study is to identify an empirical equation to estimate particulate matter less than 10 micrometers in diameter (PM<sub>10</sub>) concentrations through correlations between in situ measurements of this pollutant with values derived from Cuenca's urban area Landsat 8 satellite imagery. A multiple linear regression model is generated applying top of the atmosphere reflectance (TOA) and digital numbers (DN), which gives a multiple determination coefficient R<sup>2</sup> of 0.55 and a p-value of 0.002. The generated PM<sub>10</sub> distribution map allows the estimation of the pollutant's concentration in places where the monitoring network has no coverage. However, there are certain locations where estimated PM<sub>10</sub> values overpasses the average range, for which an in-situ validation is suggested.*

Keywords: **air quality, urban pollution, particulate matter, PM<sub>10</sub>, remote sensing, Landsat 8.**

## I. INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica ha sido estudiada y analizada dada su relación directa con la generación de problemas ambientales y de salud en los habitantes, principalmente de áreas urbanas con un marcado desarrollo industrial y productivo. Esto ha despertado la necesidad de monitorear las concentraciones de diversos contaminantes a través de equipos in situ, de manera que se puedan determinar las causas, formas de dispersión y las medidas preventivas y de control que se deben tomar para poder afrontar el problema (Christopher & Gupta, 2010; Grantz, Guo et al., 2014).

Las redes de monitoreo son los instrumentos utilizados para suministrar información regular sobre la calidad de aire, determinando parámetros como monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, ozono, material particulado y datos meteorológicos (Jung, Y., Park, W., & Park, O. 2003; Grosso, Ferreira, & Mesquita, 2007). Estas cuentan con una buena resolución temporal y exactitud (Li & Hou, 2015). Las redes de vigilancia requieren de un análisis del territorio a monitorear, para determinar así el número y ubicación de las estaciones, así como la cantidad de parámetros de estudio, considerando la disponibilidad de recursos de la zona (Ministerio del Ambiente, 2010). A más de limitaciones económicas, las redes de monitoreo terrestres no ofrecen una cobertura global de las concentraciones de contaminantes, debido a que una estación representa un solo punto de observación y su generalización podría verse limitada con respecto al área de estudio. (Guo et al., 2014; Gupta et al., 2006; Othman, Jafri, & Lim, 2010).

El análisis de la atmósfera puede realizarse aplicando nuevas tecnologías, como es el caso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y sensores remotos. Los sensores remotos permiten, a través de imágenes satelitales, analizar propiedades físicas de la atmósfera, de manera que se pueden determinar concentraciones de contaminantes con una mayor área de visualización y estudio, aumentando así el rango de observación. De esta manera se aporta a los datos de monitoreo in situ permitiendo analizar los patrones de dispersión del contaminante a nivel global, regional o local (Grosso, Ferreira, & Mesquita, 2007). Los valores de concentración de contaminantes pueden obtenerse directamente con el uso de sensores propios para su detección o del procesamiento de estas imágenes y correlaciones de datos obtenidos con estas concentraciones. Algoritmos de determinación de Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD) y de reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) son generalmente utilizados para la determinación de aerosoles, que posteriormente permiten estimar valores de material particulado.

El material particulado forma parte de los aerosoles, correspondiendo a las partes sólidas y líquidas, que no se depositan, sino que permanecen en la atmósfera, alcanzando grandes distancias y facilitando así su entrada al organismo a través de la vía respiratoria. Se clasifican en aquellas partículas con diámetro menor a 10 micras ( $PM_{10}$ ) y aquellas con diámetro menor a 2.5 micras ( $PM_{2.5}$ ). Las primeras pueden ingresar desde la nariz y la garganta hasta los pulmones, mientras que el  $PM_{2.5}$  ingresa directamente a los alveolos pulmonares hacia el torrente sanguíneo (Brook et al., 2010). El material particulado es de importancia además para el ambiente debido a su capacidad de interacción con la atmósfera terrestre. Se han identificado impactos en aspectos bióticos como inhibición de la capacidad fotosintética en plantas y afecciones a la integridad física de la fauna cercana a focos de contaminación, incidiendo directamente en los ecosistemas (Christopher & Gupta, 2010; Grantz, Garner, & Johnson, 2003; Guo et al., 2014).

El uso de imágenes satelitales para el monitoreo de la calidad del aire aporta una visión global de la zona de estudio, indicando inclusive las fuentes de contaminación y donde se deben enfocar aquellas medidas de prevención y control. Esta tecnología es aplicable a la estimación de material particulado debido principalmente a sus características físicas que pueden ser detectadas a partir del espectro electromagnético. A pesar de su limitación temporal, las imágenes satelitales aportan con una visión única sobre la calidad del aire, complementando los métodos convencionales (Wald & Baleyraud, 1999).

La mayoría de estudios aplican distintos algoritmos de Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD) para su posterior correlación con concentraciones de material particulado tanto  $PM_{10}$  como  $PM_{2.5}$ . Los algoritmos empleados varían en complejidad pues introducen variables físicas para su cálculo. Dentro del estudio de Aerosoles se ha utilizado el satélite Landsat con resultados positivos en lugares como Arabia Saudita, donde se toma en cuenta bandas RGB para encontrar un algoritmo multispectral que permita modelar el comportamiento del  $PM_{10}$  en la atmósfera, concluyendo que son métodos aplicables para la generación de mapas de distribución de contaminantes y para ubicación de puntos de contaminación de áreas urbanas (Luo, Wong, Zhao, Yan, & Xiao, 2015; Othman et al., 2010).

La mayoría de estudios han sido realizados a nivel del mar o en localidades de baja altitud, con terrenos planos. Sin embargo, el área de estudio para la presente investigación se encuentra dentro de los Andes Neotropicales, en una ciudad de altura como es la ciudad de Cuenca a 2.550 m.s.n.m. con una topografía compleja. Los Andes Neotropicales incluyen Perú, Ecuador, Colombia y Venezuela entre otros países, los cuales se caracterizan por ser sitios de alta biodiversidad atravesados por la Cordillera de los Andes (Bird Life International & Conservation International, 2005); cadena montañosa que contribuye a la diversidad climática y biótica dentro de la región (Kricher, 2010). El área de estudio presenta importantes propiedades topográficas a analizarse, ya que el cálculo de material particulado estimado a partir de información satelital puede verse influenciado por nubes convectivas o por sombras inducidas por el terreno (Emili, Popp, Riffler, & Bern, 2016). Por tanto, el objetivo de esta investigación es determinar valores de  $PM_{10}$  en el área urbana de la ciudad de altura de Cuenca a partir de valores de reflectancia y niveles digitales recuperados de imágenes satelitales Landsat 8.

## II. MÉTODO

### A. ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio comprendió la zona urbana de la ciudad de Cuenca, perteneciente al cantón Cuenca, provincia del Azuay, ubicada en la región seis de la República del Ecuador. La ciudad cuenta con una superficie de 70,59 km<sup>2</sup> y una población de 331.888 habitantes (INEC, 2010). Se localiza en la zona centro sur del país, a 2.550 m.s.n.m. en un valle del callejón interandino de la parte meridional de la Cordillera de los Andes. Se encuentra atravesada por cuatro ríos: Tomebamba, Yanuncay, Tarqui y Machángara. Su clima es templado con una temperatura promedio de 15 °C, sin embargo, puede presentar cambios bruscos de clima en el transcurso del día.

De acuerdo al Reporte de Calidad del Aire del 2011, la ciudad de Cuenca presenta una deterioración de la calidad del aire, y, por tanto, en la calidad de vida de sus ciudadanos debido al



tráfico vehicular, actividad industrial y expansión urbana. El reporte concluye que ciertas áreas de la ciudad no cumplen con los parámetros establecidos por las normativas nacionales e internacionales, destacando que el material particulado (PM<sub>2.5</sub>) - obtenido a partir de correlaciones empíricas con PM<sub>10</sub> - presenta concentraciones de contaminantes preocupantes y nocivas para la calidad del aire de la ciudad (Alcaldía de Cuenca & Red de Monitoreo EMOV EP., 2012).

## B. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

Para la presente investigación se obtuvieron tanto, datos in situ de calidad del aire del área de estudio, así como imágenes satelitales que cubrieron la misma.

Los datos in situ incluyeron básicamente mediciones de material particulado menor a 10 micras, los cuales provienen de la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Cuenca de la Empresa Pública Municipal de Movilidad, Tránsito y Transporte, EMOV-EP, activa desde el año 2010. Esta red está provista de una subred activa de PM<sub>10</sub>, que cuenta con tres equipos semiautomáticos de alto volumen para la obtención de muestras durante 24 horas consecutivas de exposición, con un intervalo de frecuencia de toma de muestras de 6 días y un porcentaje de error del 8% (Dávila, 2016). Estos equipos cuentan con una escala urbana/vecinal y se encuentran distribuidos (Figura 1) en tres estaciones de monitoreo a lo largo de la ciudad (Alcaldía de Cuenca & Red de Monitoreo EMOV EP., 2012), cuyas coordenadas se detallan en la Tabla I. La base de datos se evaluó en el programa Excel del paquete Microsoft Office Professional Plus 2013 en busca de vacíos de información e incongruencias, y en los softwares R versión 3.2.2 y RStudio versión 0.99.484 donde se obtuvo estadística descriptiva, para finalmente resumir la información en una matriz con datos promedio y máximos mensuales.

Las imágenes satelitales utilizadas correspondieron al satélite Landsat 8. Su órbita se encuentra a 705 km de altura y tiene una resolución espacial de 30 metros para el sensor Operational Land Imager (OLI) y 100 metros para el Thermal Infrared Sensor (TIRS); y una resolución temporal de 16 días (Knight & Kvaran, 2014; Reuter et al., 2015). Las imágenes se obtuvieron de la base de datos de la USGS [http://earthexplorer.usgs.gov]. Se buscaron imágenes de los años 2013 y 2014 de los cuales se contó con una base de datos in situ completa, recuperando aquellas en path: 10 y row: 62. Para su selección se analizó que las imágenes cuenten con una cobertura de nubes menor al 60%, procurando que el área de estudio se encuentre despejada. Las imágenes elegidas para el estudio se encuentran enlistadas en la Tabla II, trabajando con un total de siete imágenes para el periodo de estudio mencionado.

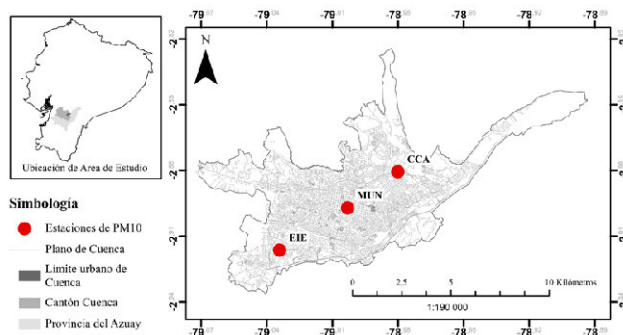


Figura 1. Mapa de ubicación de estaciones de PM<sub>10</sub> de la Red de Monitoreo EMOV-EP.

TABLA I

COORDENADAS DE UBICACIÓN DE ESTACIONES DE PM<sub>10</sub> DE LA RED DE MONITOREO EMOV-EP (FUENTE DE DATOS: EMOV-EP, 2013)

CÓDIGO	NOMBRE	LATITUD	LONGITUD
CCA	Colegio Carlos Arizaga Vega	-2,880532°	-78,980024°
MUN	Municipio	-2,897001°	-79,003000°
EIE	Escuela Ignacio Escandón	-2,916303°	-79,034047°

TABLA II

IMÁGENES UTILIZADAS PARA LA OBTENCIÓN DE INFORMACIÓN SATELITAL (FUENTE DE DATOS: USGS, 2013 - 2014)

CÓDIGO	FECHA	NUBOSIDAD	NUBOSIDAD ÁREA DE ESTUDIO
LC80100622013124LGN01	04/05/2013	59,86%	20%
LC80100622013220LGN00	08/08/2013	37,39%	15%
LC80100622013332LGN00	28/11/2013	36,91%	0%
LC80100622014063LGN00	04/03/2014	58,61%	10%
LC80100622014159LGN00	08/06/2014	56,76%	10%
LC80100622014207LGN00	26/07/2014	42,77%	5%
LC80100622014303LGN00	30/10/2014	37,52%	10%

Adicionalmente se utilizó una base de datos meteorológica, que se obtuvo de estaciones manejadas por la Escuela de Ingeniería Ambiental de la Universidad Politécnica Salesiana, ubicadas en diferentes puntos del cantón Cuenca. Información de temperatura y humedad relativa se utilizó en la fase de validación del modelo, a más de un mapa térmico generado con las imágenes satelitales Landsat 8 seleccionadas. Se analizará a profundidad el objetivo de uso y proceso aplicado a estos datos en la sección pertinente.

## C. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

Las imágenes Landsat 8 contienen esencialmente Números Digitales (DN) cuantificados y calibrados a escala tanto en las imágenes del sensor OLI y del sensor TIRS. Los datos de DN pueden ser transformados a valores de radiancia y posteriormente de reflectancia. La primera consiste en convertir la información a valores de radiancia del sensor con información de calibración del mismo. La segunda transformación convierte los valores de radiancia del sensor a valores de radiancia en la superficie de la tierra o reflectancia (Hameed & Hasan, 2014). Para el caso de productos Landsat 8, específicamente del sensor OLI, los metadatos contienen factores que convierten directamente los DN a valores de reflectancia, sin realizar la conversión de radiancia. Para este proceso se aplicaron los algoritmos presentados en la Ecuación 1 y la Ecuación 2 (USGS, 2015).

$$\rho\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p \quad (1)$$

donde  $\rho\lambda'$  es la Reflectancia planetaria en el tope de la atmósfera (TOA), sin corrección para el ángulo solar,  $M_p$  es el Factor de escala multiplicativa específico para cada banda obtenido de los metadatos (REFLECTANCE\_MULT\_BAND\_X, donde x es la banda),  $A_p$  es el Factor de escala aditiva específico para cada banda obtenido de los metadatos (REFLECTANCE\_ADD\_BAND\_X, donde x es la banda),  $Q_{cal}$  es el Valor de pixel standard cuantificado y calibrado (DN).

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos \theta_{SZ}} = \frac{\rho\lambda'}{\sin \theta_{SE}} \quad (2)$$

donde  $\rho\lambda$  es la Reflectancia planetaria en el tope de la atmósfera (TOA),  $\rho\lambda'$  es la Reflectancia planetaria en el tope de la

atmósfera (TOA) sin corrección para el ángulo solar,  $\theta_{SE}$  es el ángulo de elevación local del sol, proporcionado en los metadatos (SUN\_ELEVATION),  $\theta_{SZ}$  es el ángulo cenital del sol y  $\theta_{SZ}$  es el resultado de  $90^\circ - \theta_{SE}$ .

Los algoritmos presentados se aplicaron en las bandas del sensor OLI, desde la Banda 1 a la Banda 7, excluyendo la banda pancromática (Banda 8) y cirros (Banda 9) debido a que su resolución espacial es diferente y sus aplicaciones son distintas a los propósitos de la investigación. Para tal propósito se utilizó el software QGIS versión 2.10.1 - Pisa, con ayuda de Semi-Automatic Classification Plugin versión 4.9.3 - Frascati, desarrollado por Lucas Congedo que permite realizar la clasificación semi-automática y supervisada de imágenes satelitales, pre-procesamiento de imágenes, post-procesamiento de clasificaciones y cálculos ráster (Congedo & Munafò, 2012).

En una primera instancia del estudio, se pretendía utilizar como variables la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD, por sus siglas en inglés Aerosol Optical Depth) que no es más que la diferencia entre la reflectancia TOA y la reflectancia en la superficie terrestre (DOS1, por el método aplicado para su cálculo), según indica la Ecuación 3. Se realizó el cálculo de esta variable en las imágenes seleccionadas, sin embargo, no se obtuvieron los resultados esperados, por lo cual el método no se analizó a profundidad, pero será discutido posteriormente.

$$OD = TOA - DOS1 \quad (3)$$

#### D. CONSTRUCCIÓN DE LA BASE DE DATOS

Una vez aplicados los algoritmos a las bandas seleccionadas de las imágenes del área de estudio, se procedió a armar la base de datos que sirvió para la generación del modelo de regresión lineal múltiple. Para esto se tomó el valor de reflectancia TOA del píxel correspondiente a la ubicación de las estaciones de PM<sub>10</sub> in situ, para cada una de las bandas del sensor OLI y adicionalmente el valor de DN de las bandas 10 y 11 del sensor TIRS.

Estas últimas bandas se adicionaron ya que probaron tener éxito al momento de estimar material particulado, donde el coeficiente de determinación de Pearson aumenta notablemente al incluir la banda térmica del satélite Landsat en el modelo de regresión (Lim et al., 2004), lo cual se planteó comprobar en este estudio también.

Los datos de PM<sub>10</sub>, por su parte, se obtuvieron de cada estación considerando la fecha de toma de muestra posterior más cercana a la fecha de la imagen satelital, considerando que la toma de muestras se realiza cada seis días, por tanto, asumiendo que el dato posterior más próximo representó la concentración de PM<sub>10</sub> para el día de toma de cada imagen.

De esta recuperación de información se obtuvo una matriz de datos con 21 observaciones, pues existen tres estaciones y siete imágenes a analizar; con nueve variables a correlacionarse con la concentración de PM<sub>10</sub> in situ, considerando los valores de reflectancia TOA de la banda 1 a la 7 y los DN de las bandas 10 y 11.

#### E. OBTENCIÓN, APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

Se utilizó el software R para la generación de los modelos de regresión lineal múltiple. De manera inicial, se realizaron combinaciones de cuatro, tres, dos y una de las nueve variables utilizadas debido al número limitado de datos, para determinar la mejor combinación de las mismas. El modelo de regresión corresponde a un modelo lineal y con múltiples

variables que ayudan a estimar o predecir la variable independiente que en este caso es el PM<sub>10</sub>. Para aplicar el modelo se siguió la Ecuación 4, la cual permitió encontrar la mejor combinación de variables entre sí.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (4)$$

donde  $y$  es la variable independiente,  $x_i$  son las variables dependientes o regresores y  $b_i$  son las constantes determinadas empíricamente.

A partir del coeficiente de determinación  $R^2$  (el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson) se evalúa la variabilidad de los datos explicados por el modelo, siendo valores cercanos a 1 equivalentes a una relación perfecta. En la investigación se obtuvieron aquellos modelos con un coeficiente de determinación que explique una variabilidad mayor al 50% ( $R^2 > 0.5$ ) y con un nivel de significancia menor al cinco por ciento (valor- $p < 0.05$ ), para analizar las variables que componen cada uno, de manera que pudieron eliminarse aquellos con variables que tengan coeficientes de determinación altos entre sí (covariables). Posteriormente, se seleccionaron los mejores modelos que cumplieran con las condiciones establecidas y se realizó un análisis de los residuales de los mismos para determinar el de mejor comportamiento estadístico, hasta obtener un modelo final que sirvió para la estimación de PM<sub>10</sub> en el área de estudio.

Adicionalmente, se realizó una validación cruzada de los modelos preliminares, aplicando el método que deja un valor fuera. Esta validación se realizó con el objetivo de medir el comportamiento predictivo del modelo estadístico y determinar si existe un sobreajuste del modelo seleccionado (Hyndman, 2010).

La ecuación generada a partir del modelo se aplicó a las imágenes que presenten el área de estudio completamente despejada. Por lo tanto, se utilizó la imagen del 4 de marzo, 26 de julio y 30 de octubre de 2014, las cuales no presentaron nubosidad sobre la ciudad de Cuenca.

Por último, se realizaron correlaciones de los resultados de las concentraciones de PM<sub>10</sub> obtenidos con información de temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del suelo. Se obtuvieron datos de temperatura y humedad relativa de los días y horas correspondientes a las imágenes satelitales previamente mencionadas que fueron interpolados con el método de CoKriging utilizando la altura de cada punto como variable de correlación. Posteriormente se realizó un promedio de los rústers de temperatura ambiente y humedad relativa generados. Para el caso de la temperatura del suelo, se generaron mapas térmicos con las imágenes mencionadas haciendo uso de las bandas térmicas y del índice de vegetación normalizado dentro de su algoritmo.

### III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### A. ANÁLISIS DEL MODELO GENERADO

Los resultados preliminares obtenidos de las combinaciones utilizadas para generar los distintos modelos y que cumplen con los criterios establecidos se resumen en la Tabla III. Se incluyó junto a ellos los valores de coeficiente de determinación  $R^2$ , a más de esto el  $R^2$  ajustado y el valor- $p$  con el cual se puede comprobar que se cumplen los criterios previamente establecidos.

**TABLA III**  
MODELOS PRELIMINARES RESULTANTES DE LAS REGRESIONES LINEALES MÚLTIPLES

MODELO	ECUACIÓN	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> AJ.	VALOR-P
A	PM <sub>10</sub> = -130 + 0,005*DN_B11 + 616*TOA_B2 - 45,6*TOA_B4 - 193*TOA_B5	0,5571	0,4464	0,0081
B	PM <sub>10</sub> = -127 + 0,004*DN_B11 + 592*TOA_B2 - 223*TOA_B5 + 13,3*TOA_B6	0,5557	0,4446	0,0083
C	PM <sub>10</sub> = -126,9 + 0,005*DN_B11 + 582,7*TOA_B2 - 207,1*TOA_B5	0,5548	0,4763	0,0027

A partir del análisis de los modelos obtenidos, se eligió el modelo C que cumplió con los criterios establecidos y que además tuvo las mejores características estadísticas para representar el comportamiento del material particulado menor a diez micras en el área de estudio. El modelo final es el que se presenta en la Ecuación 5.

$$PM_{10}(\mu/m^3) = -126,9 + 582,7 * TOA_{Banda\ 2} - 207,1 * TOA_{Banda\ 5} + 0,005039 * DN_{Banda\ 11} \quad (5)$$

donde PM<sub>10</sub> (µg/m<sup>3</sup>) es la Estimación de la concentración de material particulado menor a 10 micras en microgramos por metro cúbico en función de parámetros multiespectrales del satélite Landsat 8, TOA Banda 2 es la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 2, TOA Banda 5 es la reflectancia en el tope de la atmósfera de la banda 5 y DN Banda 11 es el número digital de la banda 11.

El análisis estadístico del modelo se encuentra resumido en la Tabla IV donde se indica un error residual estándar de 7,589 µg/m<sup>3</sup> con 17 grados de libertad, ya que se trabajó con 21 observaciones y 4 variables dentro del modelo. Conociendo que los valores de PM<sub>10</sub> que se presentaron en el área de estudio se encontraron entre 12 y 110 µg/m<sup>3</sup> aproximadamente, se considera un valor aceptable de error de estimación de las concentraciones.

El coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) es de 0,5548; a pesar de ser un valor aparentemente bajo, estudios previos en esta área presentan valores de R<sup>2</sup> entre 0,6 y 0,8 (Amanollahi, Abdullah, Farzanmanesh, Ramli, & Pirasteh, 2011; Grosso et al., 2007; Gupta et al., 2006; Othman et al., 2010; Wang & Christopher, 2003). Tomando en cuenta la gran cantidad de limitantes al momento de realizar el modelo de regresión, principalmente el número de observaciones, se puede decir que el valor del coeficiente de determinación es aceptable para la estimación de concentraciones de PM<sub>10</sub> en el área de estudio, aunque podría mejorarse tomando en cuenta un mayor número de observaciones en investigaciones futuras.

El coeficiente de determinación ajustado fue de 0,4763, siendo este el mayor coeficiente de los tres modelos preliminares analizados. Este valor fue positivo y relativamente alto por lo que se acepta para el modelo final. El valor-p por su parte es de 0,002738, un nivel de significancia aceptable considerando que es menor a 0,05, siendo estadísticamente significativo.

**TABLA IV**  
ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL MODELO SELECCIONADO

Residuales:					
	Mínimo	Cuartil 1	Mediana	Cuartil 3	Máximo
	-10,827	-4,745	-2,078	6,020	13,262
Coeficientes:					
	Estimado	Error Estándar	Valor-t	Pr(> t )	
(Intercepción)	-126,9	36,28	-3,499	0,00275	**
DN_B11	0,005039	0,001423	3,541	0,00251	**
TOA_B2	582,7	168,4	3,461	0,00299	**
TOA_B5	-207,1	84,29	-2,457	0,02506	*
---					
Código de significancia: 0 '***' 0,001 '**' 0,01 '*' 0,05 '.' 0,1 '.' 1					
Error residual estándar: 7,589 en 17 grados de libertad					
R-cuadrado múltiple: 0,5548, R-cuadrado ajustado: 0,4763					
Estadística-F: 7,063 en 3 y 17 GL, valor-p: 0,002738					

Del modelo seleccionado se pudo observar que la combinación de información que presentó el coeficiente de determinación más alto y que además cumplió con los criterios, incluyó bandas con resoluciones espectrales distintas. Se cuenta con la reflectancia TOA de la banda 2 o banda azul, que cubre longitudes de onda entre 0,45 y 0,51 µm dentro del espectro visible; reflectancia TOA de la banda 5 o banda del infrarrojo cercano, con longitudes de onda entre 0,85 y 0,88 µm, ambas con una resolución espacial de 30 metros; y DN de la banda 11 o banda del térmico infrarrojo 2, con longitudes de onda entre 11,50 y 12,51 µm y con una resolución espacial de 100 metros.

A diferencia de otros estudios, el presente se ha visto limitado por la cantidad de observaciones con las que se trabaja, únicamente 21, por lo que se han visto necesarias las técnicas para la limitación del número de variables utilizadas, de manera que estadísticamente los resultados puedan considerarse representativos. Sin embargo, se ha observado en otros estudios (Gupta et al., 2006; King, Kaufman, Tanré, & Nakajima, 1999; Li & Hou, 2015; Lim et al., 2004; Othman et al., 2010; Wong, Matjafri, Abdullah, & Lim, 2009) que utilizan una mayor cantidad de variables que las bandas generalmente utilizadas son aquellas que corresponden al espectro visible, es decir, las bandas 2, 3 y 4 para el caso del satélite Landsat 8. Estos estudios presentan buenos resultados al momento de estimar las concentraciones de PM<sub>10</sub>, pero, vale la pena señalar que las bandas citadas tienen alta correlación entre sí (Tabla V con valores subrayados), lo cual podría estar introduciendo un ruido o un error en los modelos generados en estos estudios.

**TABLA V**  
MATRIZ DE CORRELACIÓN DE VARIABLES MULTIESPECTRALES Y TÉRMICAS

	TOA_B1	TOA_B2	TOA_B3	TOA_B4	TOA_B5	TOA_B6	TOA_B7	DN_B10	DN_B11
TOA_B1	1,000								
TOA_B2	0,974	1,000							
TOA_B3	0,944	0,922	1,000						
TOA_B4	0,821	0,820	0,891	1,000					
TOA_B5	0,714	0,761	0,848	0,840	1,000				
TOA_B6	0,461	0,455	0,644	0,840	0,785	1,000			
TOA_B7	0,398	0,419	0,539	0,813	0,699	0,965	1,000		
DN_B10	0,122	0,170	0,304	0,426	0,455	0,540	0,518	1,000	
DN_B11	0,034	0,083	0,190	0,310	0,320	0,420	0,417	0,971	1,000

Las bandas del infrarrojo cercano han formado parte de los modelos para la estimación de la concentración de material particulado (Li & Hou, 2015; Wald & Baleynaud, 1999), con resultados positivos como en el modelo generado en el presente estudio. Además, la incorporación de las bandas térmicas tuvo un resultado favorable pues presentaron una buena

correlación para los modelos preliminares, comprobando, así como en el estudio de Lim et al. (2004), que estas bandas permiten mejorar la estimación de las concentraciones de PM<sub>10</sub>.

Las longitudes de onda encontradas en el modelo resultante siguen además conceptos lógicos, ya que el material particulado esencialmente será percibido dentro del espectro visible, al ser un contaminante que se dispersa en el aire ambiente, generando problemas de visibilidad. Asimismo, para el caso de bandas dentro del espectro térmico como son las bandas 5 y 11, ya que el material particulado se relaciona a periodos de mayor temperatura por ser épocas secas que no permitan que los contaminantes se asienten en la superficie y se propicie su dispersión.

**B. VALIDACIÓN DEL MODELO GENERADO**

Para seleccionar el modelo final se hizo un análisis de los residuales, donde finalmente se seleccionó el modelo C, el cual presentó las gráficas estadísticamente más aceptables que permiten tomar el modelo como válido.

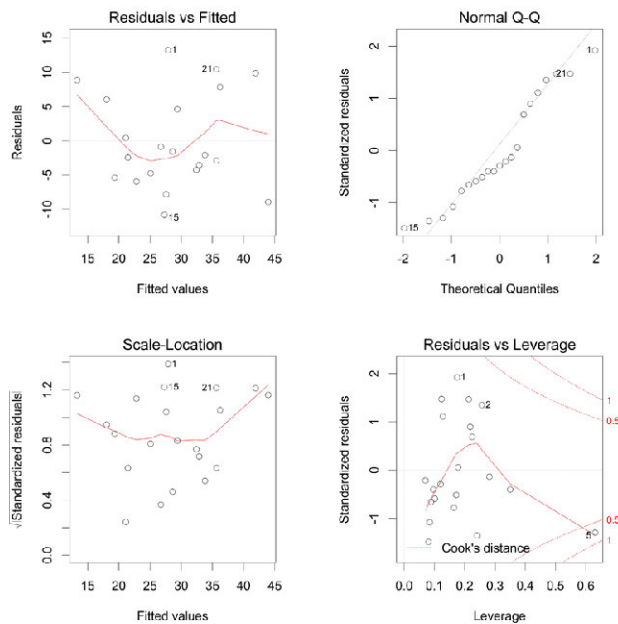


Figura. 2. Gráficas de diagnóstico de residuales del modelo de regresión seleccionado.

En la Figura 2 se pueden observar cuatro gráficas para el análisis de residuales. La gráfica 1: Residuals vs. Fitted muestra que, para el caso del modelo seleccionado, considerando la baja cantidad de observaciones con las que se trabaja, se pudo considerar que los datos se encuentran dispersos y no presentan un patrón definido, por lo que no puede asegurarse una relación lineal de los datos debido a la falta de información.

La gráfica 2: Normal Q-Q muestra que los residuales si se encuentran aproximadamente dentro del patrón aceptable, tocando nuevamente en cuenta que la cantidad de observaciones es baja por lo que lo que pueden parecer patrones en realidad podría explicarse por una falta de datos suficientes para la interpretación de la gráfica de diagnóstico.

La gráfica 3: Scale-Location indica una dispersión de los datos alrededor de una línea curva; a pesar de que se pudo suponer cierto patrón para las variancias de los residuales se consideró aceptable dadas las condiciones limitantes previamente mencionadas.

La gráfica 4: Residuals vs. Leverage permite ver que uno de los datos se encuentra por encima de la distancia Cook, el dato #5, sin embargo, su distancia no es significativa. Para asegurar que este dato no tiene una influencia ni un apalancamiento importante, se volvió a correr el modelo sin este dato, dando resultados similares, sin afectar en gran medida al modelo de regresión, por lo que se decidió mantener el dato dentro del análisis.

Para complementar la validación del modelo a partir del análisis de residuales, se realizó una validación cruzada que comprende en dejar un valor fuera de los modelos preliminarmente seleccionados de manera que se puede identificar el modelo con el mejor ajuste de los datos. Tras la validación se identificó el modelo C como aquel con menor error cuadrático medio (77,7) y mejor comportamiento estadístico como se puede observar en la Tabla VI. A más de esto, se observan las gráficas resultantes de la validación cruzada para los modelos preliminares (Figura 3).

**TABLA VI**  
ANÁLISIS DE VARIANZA MODELO A, B Y C.

ANÁLISIS DE VARIANZA: MODELO A						
	GL	Suma Cuad.	Media Cuad.	Valor F	Pr(>F)	
DN_B11	1	522	522	8,58	0,0098	**
TOA_B2	1	350	350	5,75	0,0290	*
TOA_B4	1	126	126	2,06	0,1700	
TOA_B5	1	227	227	3,73	0,0714	.
Residuales	16	974	61			
---						
Error Cuadrático Medio: 97,5						
ANÁLISIS DE VARIANZA: MODELO B						
	GL	Suma Cuad.	Media Cuad.	Valor F	Pr(>F)	
DN_B11	1	522	522	8,55	0,0099	**
TOA_B2	1	350	350	5,74	0,292	*
TOA_B5	1	348	348	5,69	0,0297	*
TOA_B6	1	2	2	0,03	0,8612	
Residuales	16	977	61			
---						
Error Cuadrático Medio: 99						
ANÁLISIS DE VARIANZA: MODELO C						
	GL	Suma Cuad.	Media Cuad.	Valor F	Pr(>F)	
TOA_B2	1	422	422	7,33	0,0149	*
TOA_B5	1	76	76	1,31	0,2676	
DN_B11	1	722	722	12,54	0,0025	**
Residuales	17	979	58			
Residuales	16	977	61			
---						
Error Cuadrático Medio: 77,7						
Códigos Sign.: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1						

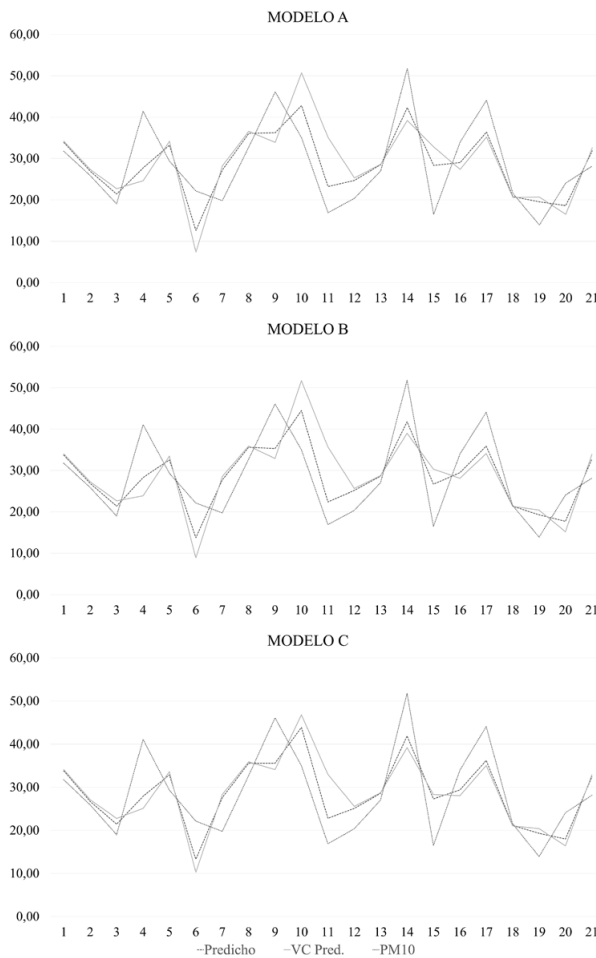


Figura. 3. Gráficas comparativas de errores cuadráticos medios de validación cruzada para los modelos preseleccionados.

**C. APLICACIÓN DE ECUACIÓN**

Al momento de aplicar la ecuación al área de estudio se observaron valores elevados al estimar las concentraciones de PM<sub>10</sub> en zonas específicas de la ciudad. Por ende, se vio necesario comprobar si estos valores extremos se debían a la influencia de variables meteorológicas. Para esto se utilizaron mapas interpolados de temperatura y humedad relativa además de un mapa térmico, correspondientes a la hora y día de cada una de las imágenes satelitales utilizadas para representar el comportamiento de la concentración estimada de PM<sub>10</sub>. Se realizó una correlación entre un promedio de los mapas de material particulado, y un promedio de los mapas de temperatura, humedad relativa y temperatura del suelo, obteniendo como resultado valores sin una relación directa entre ellos, los cuales se observa en la Tabla VII.

En la tabla se observa que ninguna de las variables meteorológicas analizadas presentó correlaciones significativas con respecto a la concentración estimada de PM<sub>10</sub>, por lo que se requiere de un análisis más profundo y de validación in situ de estos valores extremos para encontrar la causa de estos errores dentro del modelo, a realizarse en investigaciones futuras.

**TABLA VII**  
MATRIZ DE CORRELACIÓN DE INFORMACIÓN METEOROLÓGICA CON LA CONCENTRACIÓN ESTIMADA DE PM<sub>10</sub>.

	Estimación PM <sub>10</sub>	Humedad Relativa	Temperatura	Temperatura Suelo
Estimación PM <sub>10</sub>	1,000			
Humedad Relativa	-0,110	1,000		
Temperatura	0,087	-0,710	1,000	
Temperatura Suelo	0,135	-0,495	0,446	1,000

**D. MAPA DE ESTIMACIÓN DE CONCENTRACIÓN DE PM<sub>10</sub>**

Una vez seleccionado el modelo final y validado de manera estadística, se aplicó la ecuación encontrada a imágenes satelitales que presentaron el área de estudio completamente despejada; obteniendo así un mapa para cada una de estas imágenes en los que se pudo visualizar el comportamiento del PM<sub>10</sub> estimado en la ciudad de Cuenca, como se observa en la Figura 4.

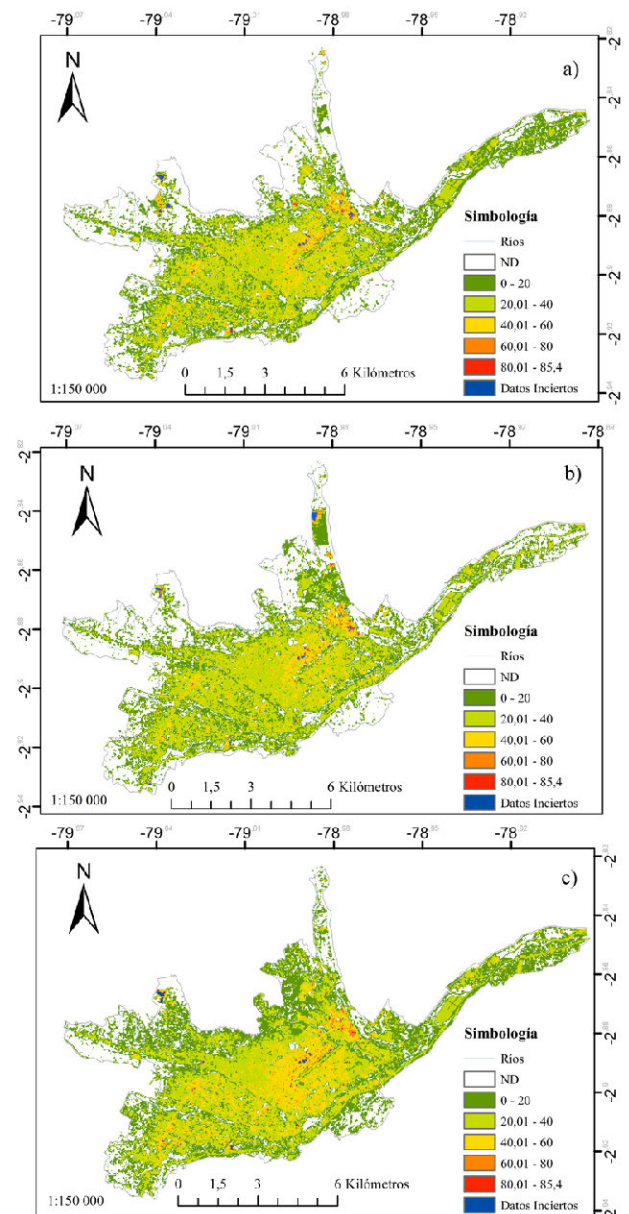


Figura. 4. Mapa de estimación de la concentración de PM<sub>10</sub> en la ciudad de Cuenca. a) Mapa para el 4 de marzo de 2014. b) Mapa para el 26 de julio de 2014. c) Mapa para el 30 de octubre de 2014.

En los mapas resultantes se mostraron valores estimados de  $PM_{10}$  que alcanzaron concentraciones altas que sobrepasan los  $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valor límite para la concentración promedio en 24 horas según la OMS, e inclusive una gran cantidad de píxeles que presentan valores mayores a  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , valor límite según la normativa ecuatoriana. Sin embargo, se observaron píxeles con valores extremos los cuales se encuentran en distintos lugares del área de estudio. Las correlaciones realizadas con las variables temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del suelo no proporcionaron una explicación para la causa de estos valores, razón por la cual se decidió tomarlos como valores inciertos para su posterior validación en futuras investigaciones. Para determinar el límite sobre el cual los datos se consideran como inciertos, se tomó el valor máximo de concentración de  $PM_{10}$  en el área de estudio para el periodo de datos utilizado en el modelo de regresión, es decir 2013 - 2014, fijando este valor en  $85,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

#### IV. CONCLUSIONES

Una característica importante de las redes de monitoreo es su alcance espacial, con un radio de monitoreo corto y limitado, existiendo la necesidad de contar con un número mínimo de estaciones, el cual según la OMS es de dos para ciudades con poblaciones menores a un millón de habitantes (Martinez & Romieu, 2003). Sin embargo, se ve necesario un mayor alcance, por lo cual en este caso de estudio se aplica una técnica alternativa, como es la teledetección, para estimar las concentraciones de este contaminante.

El modelo generado para la estimación de este contaminante aplica valores multispectrales y térmicos de las imágenes satelitales Landsat 8 trabajadas. Se puede destacar de la investigación realizada que el uso de la Profundidad Óptica de Aerosoles (AOD) no presentó resultados demasiado significativos como en otros estudios previamente mencionados, sino que el uso de la reflectancia en el tope de la atmósfera (TOA) tuvo mejores resultados por lo cual fue aplicada para la generación de los modelos de regresión lineal múltiple, arrojando resultados que representaron de mejor manera la realidad de la calidad del aire en el área de estudio. A más de esto, se incluyeron los números digitales (DN) de las bandas térmicas en el modelo, con un buen resultado, incluyendo la banda 11 en el modelo final.

Los resultados de la regresión lineal múltiple fueron aceptables, generando una ecuación empírica que permitió estimar los valores de las concentraciones de  $PM_{10}$  y representar de manera visual el comportamiento de este contaminante en la ciudad. Con un coeficiente de determinación de 0,55, considerado admisible según la revisión del estado del arte y tomando en cuenta la cantidad limitada de información con la que se cuenta para realizar el análisis pertinente. Además de esto, el coeficiente de determinación  $R^2$  ajustado de 0,47 y un valor-p de 0,002 permiten reconocer la ecuación encontrada como estadísticamente aplicable, habiendo realizado además un análisis de los residuales siendo este de entre los modelos preliminares el de mejor comportamiento. A más de esto, la validación cruzada dejando uno afuera realizada para los modelos preliminares indica que el modelo C presenta el menor error cuadrático medio (77,7) a partir del cual se puede reconocer que el modelo no se encuentra sobreestimado y permite predecir, aunque con cierta incertidumbre el comportamiento del  $PM_{10}$  en el área de estudio.

Los mapas generados se ajustaron al comportamiento observado en el área de estudio, pues las zonas con mayor con-

centración de contaminantes vienen a estar representadas por aquellos lugares donde la actividad industrial y el tráfico vehicular son elevados, así como otras circunstancias que pueden contribuir a la propagación del  $PM_{10}$  en la ciudad. No obstante, existen píxeles en los cuales la estimación de contaminante sobrepasó los rangos que se manejan en el periodo de análisis de los datos del modelo (2013 - 2014), por lo que se marcaron como datos inciertos (datos mayores a  $85,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).

Durante la investigación se intentó encontrar una correlación de estos datos y variables como temperatura ambiente, humedad relativa y temperatura del suelo, de manera que puedan explicarse estos valores sobrestimados, sin embargo, no se tuvo un resultado positivo, viéndose necesaria una validación in situ en los puntos en cuestión la cual requiere de tiempo y necesidad de días con poca nubosidad para poder realizar las mediciones y obtener las imágenes despejadas; razón por la cual no se realiza los monitoreos en esta ocasión, sino que se mantiene pendiente para la validación de resultados en futuras investigaciones.

El modelo generado para la estimación de  $PM_{10}$  es una primera aproximación al comportamiento de este contaminante en la ciudad, considerando que la cantidad de equipos de muestreo (tres) existentes por parte de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire de la EMOV-EP es insuficiente para realizar una interpolación de los datos generados, razón por la cual no existen mapas de distribución del mismo en los informes de calidad del aire anuales presentados por esta entidad.

## AGRADECIMIENTOS

A la Facultad de Ciencias Químicas, Carrea de Ingeniería Ambiental y al Centro de Estudios Ambientales (CEA) por continuar apoyando la investigación de la Química Atmosférica en los Andes del Ecuador, un agradecimiento especial a Galo Carrillo por su magnífico respaldo en el estudio de los Sensores Remotos.

## REFERENCIAS

- Alcaldía de Cuenca, & Red de Monitoreo EMOV EP. (2012). Informe de Calidad del Aire, año 2011. Cuenca, Ecuador.
- Amanollahi, J., Abdullah, M. M., Farzanmanesh, R., Ramli, M., & Pirasteh, S. (2011). PM<sub>10</sub> distribution using remotely sensed data and GIS techniques; Klang Valley, Malaysia. *EnvironmentAsia*, 7, 104-111.
- Bird Life International, & Conservation International. (2005). Áreas Importantes para la Conservación de las Aves en los Andes Tropicales: sitios prioritarios para la conservación de la biodiversidad. Quito: BirdLife International.
- Brook, R. D., Rajagopalan, S., Pope, C. A., Brook, J. R., Bhatnagar, A., Diez-Roux, A. V., ... Kaufman, J. D. (2010). Particulate matter air pollution and cardiovascular disease: An update to the scientific statement from the American Heart Association. *Circulation*, 121(21), 2331-2378. <http://doi.org/10.1161/CIR.0b013e3181d8bec1>
- Christopher, S. A., & Gupta, P. (2010). Satellite Remote Sensing of Particulate Matter Air Quality: The Cloud-Cover Problem. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 60(5), 596-602. <http://doi.org/10.3155/1047-3289.60.5.596>
- Congedo, L., & Munafò, M. (2012). Development of a Methodology for Land Cover Classification in Dar es Salaam using Landsat Imagery, (January 2012), 48. Retrieved from <http://www.planning4adaptation.eu/>
- Dávila, M. (2016). Visita Técnica a la Estación de Monitoreo Activa de Calidad de Aire de la EMOV-EP.
- Emili, E., Popp, C., Riffler, M., & Bern, U. (2016). PM<sub>10</sub> remote sensing from geostationary SEVIRI and polar-orbiting MODIS sensors over the complex terrain of the European Alpine region. *Remote Sensing of Environment*, 114(September), 2485-2499. <http://doi.org/10.1016/j.rse.2010.05.024>
- Grantz, D. ., Garner, J. H. ., & Johnson, D. . (2003). Ecological effects of particulate matter. *Environment International*, 29(2-3), 213-239. [http://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00181-2](http://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00181-2)
- Grosso, N., Ferreira, F., & Mesquita, S. (2007). Improvement in particles (PM<sub>10</sub>) urban air quality mapping interpolation using remote sensing data. *Air Pollution Modeling and Its Application XVIII, Volume 6(07)*, 265-274. [http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1474-8177\(07\)06031-7](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/S1474-8177(07)06031-7)
- Guo, Y., Feng, N., Christopher, S. a., Kang, P., Zhan, F. B., & Hong, S. (2014). Satellite remote sensing of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) air quality over Beijing using MODIS. *International Journal of Remote Sensing*, 35(17), 6522-6544. <http://doi.org/10.1080/01431161.2014.958245>
- Gupta, P., Christopher, S. a., Wang, J., Gehrig, R., Lee, Y., & Kumar, N. (2006). Satellite remote sensing of particulate matter and air quality assessment over global cities. *Atmospheric Environment*, 40(50), 5880-5892. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.03.016>
- Hadjimitsis, D. G. (2009). Aerosol optical thickness ( AOT ) retrieval over land using satellite image-based algorithm. *Air Quality, Atmosphere and Health*, 2, 89-97. <http://doi.org/10.1007/s11869-009-0036-0>
- Hameed, S., & Hasan, G. (2014). Estimation of PM<sub>10</sub> Concentration using Ground Measurements and Landsat 8 OLI Satellite Image. *Journal of Geophysics & Remote Sensing*, 3(2), 1-6. <http://doi.org/10.4172/2169-0049.1000120>
- Hyndman, R. J. (2010). Why every statistician should know about cross-validation. Retrieved from <http://robjhyndman.com/hyndsight/crossvalidation/>
- INEC. (2010). Información Censal.
- Jung, Y., Park, W., & Park, O. (2003). Pollution dispersion analysis using the puff model with numerical flow field data, 30, 277-286. [http://doi.org/10.1016/S0093-6413\(03\)00024-7](http://doi.org/10.1016/S0093-6413(03)00024-7)
- King, M. D., Kaufman, Y. J., Tanré, D., & Nakajima, T. (1999). Remote Sensing of Tropospheric Aerosols from Space: Past, Present, and Future. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(11), 2229-2259. [http://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<2229:RSOTAF>2.0.CO;2](http://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<2229:RSOTAF>2.0.CO;2)
- Knight, E., & Kvaran, G. (2014). Landsat-8 Operational Land Imager Design, Characterization and Performance. *Remote Sensing*, 6(11), 10286-10305. <http://doi.org/10.3390/rs61110286>
- Kricher, J. (2010). *Un Compañero Neotropical* (3rd ed.). American Birding Association, Inc.
- Li, B., & Hou, L. (2015). Discuss on Satellite-Based Particulate Matter Monitoring Technique. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-7/W3(May), 219-223. <http://doi.org/10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-219-2015>
- Lim, H. S., Matjafri, M. Z., Abdullah, K., Saleh, N. M., & Alsultan, S. (2004). Remote sensing of PM<sub>10</sub> from LANDSAT TM imagery. *Acrcs 2004*, 739-744.
- Luo, N., Wong, M. S., Zhao, W., Yan, X., & Xiao, F. (2015). Improved aerosol retrieval algorithm using Landsat images and its application for PM<sub>10</sub> monitoring over urban areas. *Atmospheric Research*, 153(0), 264-275. [http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.08.012](http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2014.08.012)
- Martin, R. V. (2008). Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment*, 42(34), 7823-7843. <http://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.07.018>
- Martinez, A. P., & Romieu, I. (2003). Estrategia De Monitoreo. In *Comunidad Europea (Ed.)*, Introducción al monitoreo atmosférico. (pp. 7-37). Bruselas: Biblioteca virtual de desarrollo sostenible y salud ambiental. Retrieved from <http://www.bvsde.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/intromon/cap2.pdf>
- Meena, G. S., Londhe, A. L., Bhosale, C. S., & Jadhav, D. B. (2009). Remote sensing " ground-based automatic UV / visible spectrometer " for the study of atmospheric trace gases. *International Journal of Remote Sensing*, 30(21), 5633-5653. <http://doi.org/10.1080/01431160802698901>

- Ministerio del Ambiente. (2010). Plan Nacional de la Calidad de Aire (Vol. 46). Ecuador.
- Othman, N., Jafri, M. Z. M., & Lim, H. S. (2010). Estimating Particulate Matter Concentration over Arid Region Using Satellite Remote Sensing : A Case Study in Makkah, Saudi Arabia. *Modern Applied Science*, 4(11), 131-142.
- Reuter, D., Richardson, C., Pellerano, F., Irons, J., Allen, R. G., Anderson, M., ... Thome, K. (2015). The Thermal Infrared Sensor (TIRS) on Landsat 8: Design Overview and Pre-Launch Characterization. *Remote Sensing*, 7(1), 1135-1153. <http://doi.org/10.3390/rs70101135>
- USGS. (2015). Using the USGS Landsat 8 Product. Retrieved June 22, 2016, from [http://landsat.usgs.gov/Landsat8\\_Using\\_Product.php](http://landsat.usgs.gov/Landsat8_Using_Product.php)
- Wald, L., & Baleynaud, J. . (1999). Observing air quality over the city of Nantes by means of Landsat thermal infrared data. *International Journal of Remote Sensing*, 20(5), 947-959. <http://doi.org/10.1080/014311699213019>
- Wang, J., & Christopher, S. A. (2003). Intercomparison between satellite-derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: Implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*, 30(21), 2095. <http://doi.org/10.1029/2003GL018174>
- Wong, C. J., Matjafri, M. Z., Abdullah, K., & Lim, H. S. (2009). Temporal and Spatial Air Quality Monitoring using Internet Surveillance Camera and ALOS Satellite Image. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 185-191.



# Calibración de un Modelo Basado en Agentes para el estudio del peligro de inundación en el río Santa Bárbara

Orellana Daniel<sup>1,2</sup>, Timbe Luis<sup>2</sup>, Pinos Juan<sup>2</sup>

1 Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Cuenca  
Av. 12 de Octubre, Cuenca / Azuay / Ecuador  
daniel.orellana@ucuenca.edu.ec

2 Departamento de Recursos Hídricos y Ciencias Ambientales, Universidad de Cuenca  
Av. 12 de Abril, Cuenca / Azuay / Ecuador  
luis.timbe@ucuenca.edu.ec, juan.pinosf@ucuenca.edu.ec

## RESUMEN

Las inundaciones por desborde de ríos representan uno de los riesgos naturales más importantes en las ciudades andinas. Una gestión efectiva del riesgo de inundación requiere información espacio-temporal sobre las zonas afectadas y la profundidad del agua para eventos de crecida en diferentes períodos de recurrencia. El objetivo de este artículo es comparar los resultados de un modelo conceptual de inundaciones basado en agentes (ABM) con los de un modelo hidráulico (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System HEC-RAS) para el estudio de riesgos de inundación en el Río Santa Bárbara (Gualaceo, Provincia del Azuay, Ecuador). La metodología empleada consiste en los siguientes pasos: A. Conceptualización del comportamiento del agua con respecto a la topografía, B. Implementación del modelo conceptual utilizando un modelo basado en agentes, C. Aplicación del modelo en un caso piloto, y finalmente D. Calibración de resultados con un modelo hidráulico bi-dimensional. Los resultados indican que los mapas de superficie inundada obtenidos por el modelo ABM son comparables a los del modelo hidráulico HEC-RAS. En cuanto a la profundidad del agua, el modelo ABM produce valores similares a los de HEC-RAS para la zona central del área de estudio mientras que las zonas altas y bajas presentan diferencias importantes. Por otro lado, el modelo ABM automatizado permite cuantificar fácilmente la probabilidad de inundación. Los ABM constituyen una alternativa viable a los modelos hidráulicos bi-dimensionales para estudiar cómo los errores altitudinales de los modelos digitales de elevaciones se propagan hacia los mapas de peligro de inundación. A su vez estos modelos constituyen herramientas clave para representar y comunicar la incertidumbre asociada a dichos modelos.

Palabras clave: **Modelos basados en agentes, simulación de inundaciones, gestión de riesgos, modelos digitales de elevaciones.**

## ABSTRACT

*Floods due to overflowing rivers represent one of the most important natural hazards in Andean cities. Effective flood risk management requires spatio-temporal information on affected areas and water depth for flood events at different recurrence periods. The aim of this paper is to compare the results of a conceptual agent-based model with a two-dimensional hydraulic model (HEC-RAS) for the study of flood risks in the Santa Bárbara River*

(Gualaceo, Azuay Province, Ecuador). The methodology consists of the following steps: A. Conceptualization of water behavior related to topography. B. Implementation of the agent-based model. C. Pilot application for the case of the Santa Barbara River. D. Model calibration using a two-dimensional hydraulic model. The results indicate that the flooded surface maps obtained by the ABM model are comparable to those of the HEC-RAS hydraulic model. As for water depth, the ABM model produces values similar to those of HEC-RAS for the central section of the study area, while the high and low zones present important differences. On the other hand, the automated ABM model allows to easily quantify the probability of flooding. ABM is a viable alternative to two-dimensional hydraulic models to study how altitudinal errors on digital elevation models propagate to flood hazard maps. In turn, these models are key tools for representing and communicating the uncertainty associated with these models.

**Keywords:** Agent Based Models, Flood simulation, Risk management, Digital Elevation Models.

## I. INTRODUCCIÓN

Las inundaciones fluviales representan uno de los riesgos naturales más importantes en las ciudades andinas debido a su frecuencia y altos impactos económicos. A pesar de los esfuerzos cada vez mayores de los organismos de planificación y gestión, los daños por inundaciones siguen en aumento en todo el mundo (Milly, Wetherald, Dunne, & Delworth, 2002). Una gestión efectiva del riesgo de inundación requiere información espacio-temporal sobre los eventos de crecida de los ríos, las zonas aluviales potencialmente afectadas y la profundidad del agua para eventos de crecida con diferentes períodos de recurrencia. Esta información es generalmente presentada en “mapas de inundación”.

Frente a la carencia parcial o total de información histórica de áreas inundadas, es posible analizar el peligro de inundación a través de modelos hidráulicos. Estos modelos implican al menos tres componentes: estimación de caudales de crecida (mediante modelización hidrológica o análisis de valores extremos de caudales observados), modelización hidráulica para estimar la profundidad del agua, y análisis de elevaciones del terreno para estimar las áreas de inundación (Whiteaker, Robayo, Maidment, & Obenour, 2006). Comúnmente, el resultado de estos modelos de inundación consiste en un mapa determinístico que representa el área inundada y la profundidad del agua para un flujo de caudal determinado. Por ejemplo, en la zona de influencia del río Burgay se ha utilizado un modelo hidráulico unidimensional para estimar las zonas inundables (Timbe & Timbe, 2012). Sin embargo, los valores estimados del caudal y de las elevaciones del terreno no están exentos de errores e incertidumbres, las cuales se propagan a través de los modelos afectando el resultado final (Merwade, Olivera, Arabi, & Edleman, 2008). Como consecuencia, los mapas determinísticos de inundación no suelen incluir información relacionada a los errores asociados a los datos de entrada y menos aún al grado de incertidumbre del resultado final. Esto puede tener implicaciones complejas en la toma de decisiones de planificación, prevención y respuesta a los riesgos de inundaciones.

Entre las diferentes fuentes de incertidumbre en los modelos de inundaciones, la topografía es una de las variables que más influye en la precisión de los resultados finales (Cook & Merwade, 2009; Saksena & Merwade, 2015). La topografía es usualmente representada en un modelo digital de elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés). Wechsler (2007) reporta varios aspectos de los DEMs que pueden afectar los modelos hidráulicos, entre ellos: los errores de medición, la escala impuesta, los métodos de interpolación utilizados, y los algoritmos de procesamiento empleados para generar DEMs hidrológicamente viables. Es imprescindible, por lo tanto, estudiar y cuantificar los efectos que tienen los errores altitudinales en los modelos de inundaciones y valorar la incertidumbre de los mapas producidos.

El estudio de la propagación de errores puede ser implementado utilizando diferentes enfoques, entre los cuales están aquellos basados en simulaciones de Monte Carlo. Este tipo de enfoques se basan en realizar cientos o miles de repeticiones de un modelo variando uno o más parámetros de entrada y analizar las características estadísticas de los resultados de salida. De esta manera, conociendo la distribución de probabilidad de la incertidumbre de las variables de entrada, es posible conocer la distribución de probabilidad del resultado.

En la práctica, el principal inconveniente de la utilización de simulaciones de Monte Carlo para el estudio de propagación de errores en los modelos hidráulicos de crecidas es la limitada capacidad de automatización de los paquetes informáticos utilizados, dificultando así el análisis y la cuantificación de la incertidumbre de los resultados del modelo. Por ejemplo, HEC-RAS (Hydrologic Engineering Center's River Analysis System), uno de los paquetes informáticos más utilizados para simulación de inundaciones, permite automatizar el componente unidimensional, pero no tiene capacidades de automatización para los DEMs de entrada del componente bidimensional (Brunner, 2016).

Una posible solución frente esta limitación es implementar un modelo de inundaciones conceptual utilizando un enfoque de Modelos Basados en Agentes (ABM, por sus siglas en inglés). Los ABMs son una familia de modelos de sistemas complejos en los cuales los elementos del mundo real se modelan como agentes individuales relativamente autónomos, cada uno con un comportamiento potencialmente heterogéneo e independiente, que es capaz de interactuar con otros agentes y con su entorno. Dos características clave de los ABMs los hacen interesantes para la modelación de inundaciones. Por un lado, la relación espacial entre los agentes es modelada de forma explícita, pues el entorno de los agentes (llamado “mundo” en los lenguajes ABM) es definido con sus fronteras y propiedades. Por otro lado, las características globales del sistema no se modelan directamente (top-down), sino que aparecen como resultado de las interacciones individuales, como un fenómeno emergente (bottom-up) (Holland, 2000). Los ABM facilitan, por lo tanto, el estudio de sistemas complejos a partir de las unidades que los componen, permitiendo explorar escenarios experimentales de la realidad desde lo más simple hacia lo más complejo (Izquierdo, Galán, Santos, & Del Olmo, 2008).

Los modelos de crecidas basados en agentes constituyen una prometedora aproximación al estudio de inundaciones, ya que permiten gran flexibilidad y excelentes posibilidades de automatización. Sin embargo, se conoce poco si los resultados de la simulación de inundaciones con ABMs son comparables a aquellos producidos por los modelos hidráulicos clásicos (basados en las propiedades físicas) aplicados en cuencas andinas.

El objetivo de éste artículo, por lo tanto, es comparar el mapa de inundaciones resultante de un modelo conceptual basado

en agentes con el mapa producido por un modelo hidráulico bidimensional (HEC-RAS) para el estudio de la gestión de riesgo de inundación en el Río Santa Bárbara (Gualaceo, Provincia del Azuay, Ecuador) tomando en cuenta solamente la topografía. Adicionalmente, busca demostrar la viabilidad de los ABMs para generar mapas que permitan cuantificar y comunicar la incertidumbre de los resultados producidos por los errores en dichos modelos.

Las restantes secciones de este artículo se estructuran como sigue: La sección II presenta detalles sobre la implementación de un modelo conceptual de inundaciones basado en agentes y su aplicación para analizar el riesgo de inundaciones en la ciudad de Gualaceo, Ecuador. La sección III presenta mapas de inundación del modelo conceptual y los compara con mapas obtenidos a través de un modelo hidráulico implementado en HEC-RAS. Finalmente, la sección IV expone las principales conclusiones de los autores sobre la viabilidad del uso de ABM para la modelación de inundaciones por desborde de ríos.

## II. METODOLOGÍA

La metodología empleada en el presente estudio comprende de las siguientes fases: A) Conceptualización del comportamiento del agua, B) Implementación del modelo conceptual utilizando un modelo basado en agentes, C) Aplicación del modelo en un caso piloto, y finalmente D) Calibración de resultados con un modelo hidráulico bi-dimensional.

### A. MODELO CONCEPTUAL DE COMPORTAMIENTO DEL AGUA

El comportamiento del agua durante un evento de inundación es un fenómeno altamente complejo, pues está influenciado por factores como el caudal de ingreso, la topografía y la rugosidad del terreno. Todos estos factores suelen ser considerados en las ecuaciones de flujo de los modelos hidráulicos. Para ésta investigación se ha optado por el principio de parsimonia con el fin de producir un modelo lo suficientemente sencillo como para poder ser implementado con un método basado en agentes que sea automatizable, pero que a su vez represente adecuadamente las interacciones entre el agua y la topografía. Aunque la intención del presente artículo no es presentar el modelo basado en agentes (el cual se detalla en otra publicación en elaboración), en los siguientes párrafos se presenta una breve descripción del mismo.

El modelo conceptual se basa en la analogía de la bañera: El comportamiento del agua en el terreno es modelado como un conjunto de bañeras comunicadas por tuberías y localizadas en cada celda del DEM. El flujo desde una celda se modelada a partir de la diferencia entre la altura absoluta del agua en una celda y cada una de las celdas vecinas. Si la altura del agua en la celda central es mayor, el agua fluye hacia las celdas vecinas; si es menor, el agua fluye de las celdas vecinas hacia la celda central; si la altura es igual, el flujo es cero (Figura 1).

### B. IMPLEMENTACIÓN DE UN MODELO BASADO EN AGENTES

La implementación de ésta analogía en un modelo basado en agentes es relativamente directa. Se modelan dos tipos de agentes: "celda" y "agua"; los agentes "celda" representan las localizaciones con sus respectivos valores de elevación del terreno ( $th$ ), mientras que los agentes "agua" representan las bañeras. Con el fin de optimizar el modelo, los agentes "agua" se crean progresivamente según fluye el agua dentro del modelo. El lugar por donde el agua entra al "mundo" es modelado asignando a una o varias celdas la propiedad "origen". Durante la ejecución del modelo, cada agente "agua" escanea su entorno y compara la altura absoluta de agua con la de

sus celdas vecinas. Si la altura es mayor, se crea un agente "agua" en la celda correspondiente y se determina la cantidad de agua a fluir en función de la diferencia de altura. Este proceso se repite en cada paso del tiempo. Cuando el agua llega al "borde del mundo" fluye hacia fuera y se elimina del modelo. El "origen y borde del mundo" equivale a las condiciones de contorno de un modelo hidráulico tradicional.

Este comportamiento relativamente sencillo a nivel individual da lugar a un comportamiento complejo a nivel global, y permite recrear diversos escenarios tales como el desborde de un río o las inundaciones por lluvia. Es importante notar que el modelo no incluye otros factores que afectan el comportamiento del agua, tales como la velocidad de flujo la infiltración o los coeficientes de fricción de Manning.

El modelo se implementó en lenguaje NetLogo 6.0 utilizando como base un modelo desarrollado por Ligtenberg y de Bruin en el Laboratory of Geo-information Science and Remote Sensing de Wageningen University (Países Bajos). Los detalles del modelo, así como el código completo serán publicados como material adicional de un artículo de próxima publicación dedicado al tema.

La implementación del modelo permite parametrizar todas las variables de un evento de inundación. Entre ellas, las más importantes para simular un evento de caudal pico son: Flujo base, que representa el caudal en  $m^3/s$  del río en condiciones normales y que es utilizado para estabilizar el modelo como condición inicial antes del evento de inundación. Tiempo de estabilización, es el tiempo necesario para estabilizar el modelo, y representa el tiempo en minutos del mundo real que tarda el agua en recorrer el cauce del río desde el inicio hasta el fin de la zona de estudio. Flujo pico, es el caudal máximo que se alcanza durante un evento de crecida. Tiempo pico, es el tiempo en minutos del mundo real en el que se alcanza el flujo pico. Tiempo Final, es el tiempo que dura la simulación en minutos del mundo real. Este conjunto de parámetros forma el "hidrograma" del evento de inundación. Por lo tanto, cada simulación está definida por su correspondiente hidrograma de caudal.

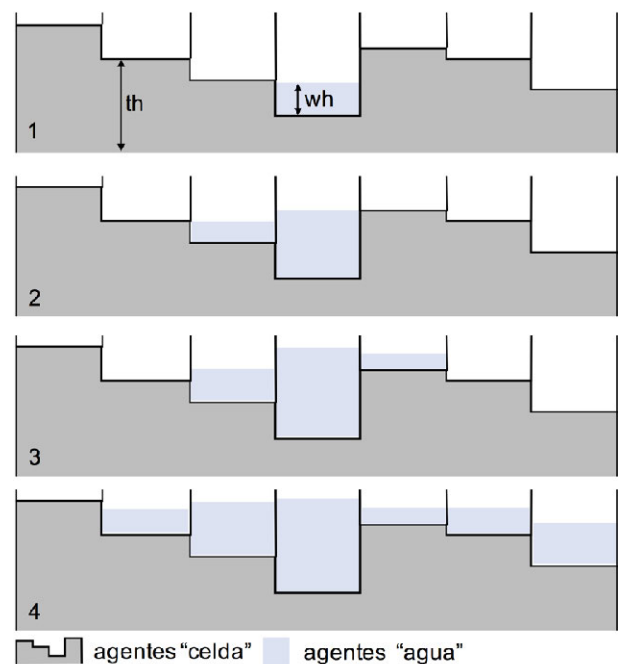


Figura 1. Modelo conceptual de la bañera para representar la interacción del flujo de agua con la topografía. DOI: 10.6084/m9.figshare.5047057.

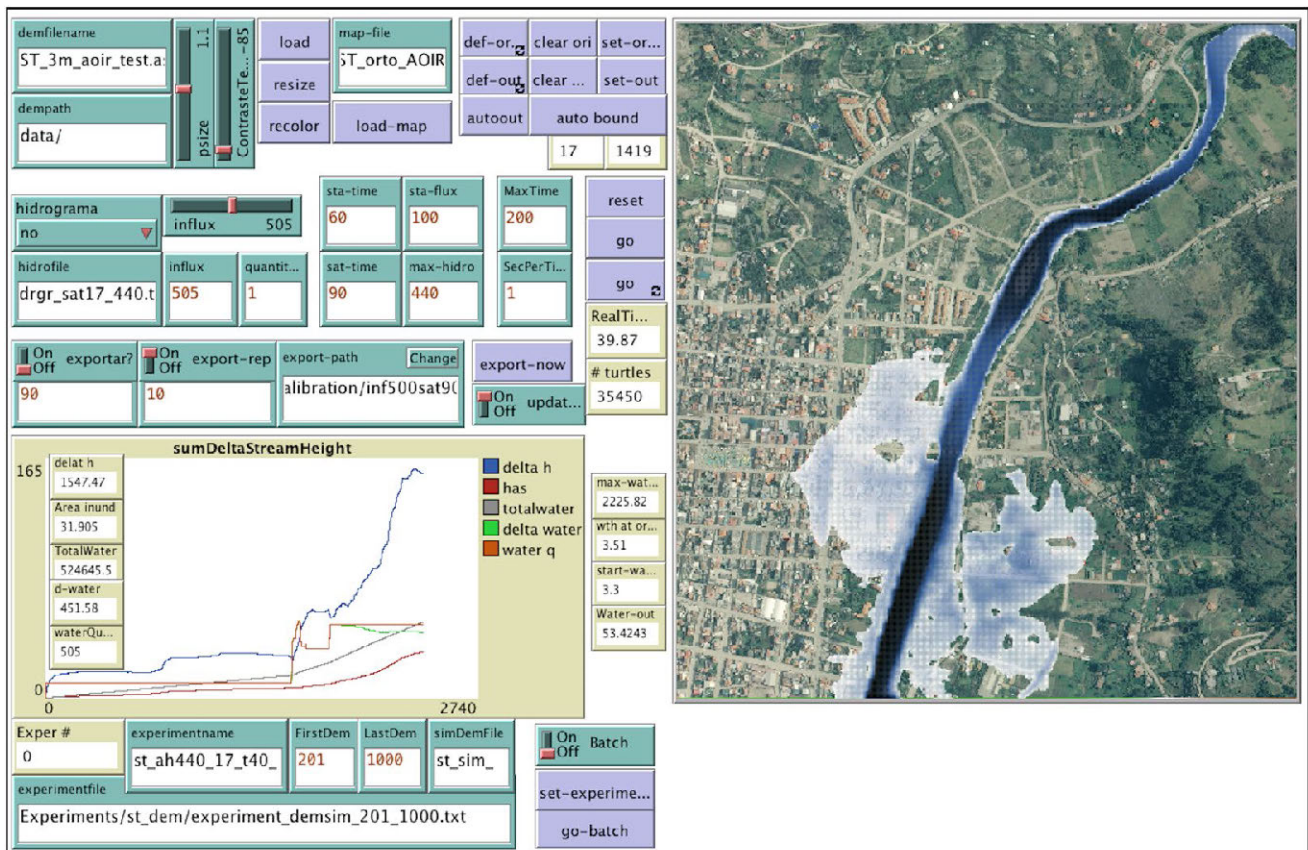


Figura 2: Interfaz de usuario del modelo implementado en NetLogo 6.0. DOI: 10.6084/m9.figshare.5047057.

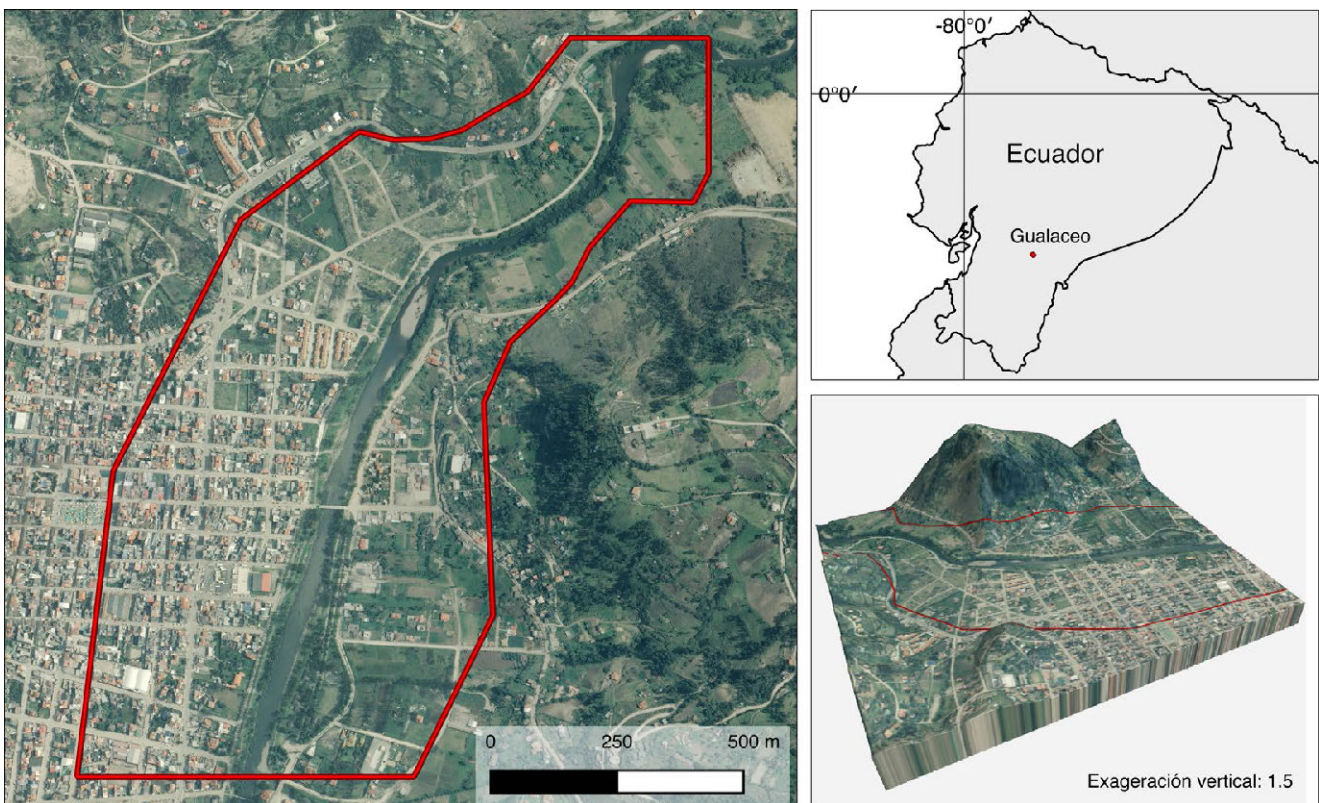


Figura 3. El área de estudio está constituida por la zona de influencia del río Santa Bárbara a su paso por la ciudad de Gualaceo (Azuay, Ecuador). El recuadro inferior derecho es una representación tridimensional de la zona)

Adicionalmente, se definen las condiciones de borde, es decir el comportamiento del agua al ingresar y al salir del modelo. Estas condiciones incluyen: Origen, es el conjunto de celdas que definen el lugar por donde el agua entra al modelo, es decir la parte más alta del cauce del río. Salida, es el conjunto de celdas que definen los sitios por los que el agua puede salir del modelo. La figura 2 muestra la interfaz del modelo implementado.

### C. APLICACIÓN PILOTO

El modelo implementado fue puesto a prueba para estudiar el comportamiento del agua en un evento de inundación del río Santa Bárbara. El área de estudio comprende la zona de influencia del río Santa Bárbara en la zona norte de la ciudad de Gualaceo (Azuay, Ecuador), ubicada en un valle interandino con un rango altitudinal entre los 2200 y 2500 m s.n.m. La zona oeste del río está ocupada principalmente por el área urbana de Gualaceo y la zona este presenta un mosaico de parcelas agrícolas y construcciones dispersas (Figura 3).

Los datos utilizados incluyen un Modelo Digital de Elevaciones con una resolución espacial de 3m proveniente del proyecto SIGTIERRAS (MAGAP, 2012) y datos de caudal obtenidos por SENAGUA (2014).

### D. CALIBRACIÓN CON UN MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL

Con la finalidad de explorar la viabilidad del ABM implementado para producir mapas de inundación, el modelo fue comparado con una simulación equivalente implementada en el modelo hidráulico bidimensional HEC-RAS. Este es uno de los modelos más utilizados en estudios de inundaciones y ampliamente aceptado por investigadores y técnicos, por lo que seleccionado como modelo de referencia.

El proceso de calibración inició ejecutando una primera vez el ABM con el mismo hidrograma de la simulación de referencia en HEC-RAS. A continuación, se repitió secuencialmente la simulación ABM usando diferentes combinaciones de valores para los parámetros de entrada del hidrograma Tiempo de Estabilización, Flujo Pico, Tiempo Pico y Tiempo Final, y explorando el mapa de inundación resultante hasta obtener valores similares al mapa de referencia.

Los parámetros de evaluación incluyeron: límites del área inundada, superficie total inundada y profundidad de inundación. Adicionalmente se calculó el valor medio cuadrático (RMS, por sus siglas en inglés) de las diferencias entre los valores de profundidad de inundación de los resultados del ABM y los valores correspondientes del modelo HEC-RAS. Esto permitió obtener un único valor estadístico (función objetivo) que puede ser utilizado para evaluar de forma general el ajuste del modelo. Si los resultados de los dos modelos son muy diferentes, el RMS tiende a ser mayor, y viceversa. Un RMS = 0 implica que los resultados de las dos simulaciones son iguales.

Debido a que el número de combinaciones posibles de valores de los parámetros de entrada puede llegar a ser demasiado grande para ser implementado en la práctica, se realizó un análisis exploratorio preliminar para reducir estos valores a unos rangos mínimos y máximos fuera de los cuales los resultados serían demasiado diferentes a la simulación de referencia.

Todos los cálculos estadísticos se realizaron en lenguaje R (R Core Team, 2016) y los resultados fueron representados geográficamente en el sistema de información geográfica QGIS 2.18 (QGIS Developing Team, 2016).

## III. RESULTADOS

Al ejecutar cada simulación, el modelo inicia ingresando 100 m<sup>3</sup>/s de agua en el Origen y permitiendo que circule por el cauce del río durante el Tiempo de Estabilización. Una vez que el cauce se ha estabilizado (el agua ha alcanzado el borde final del área de estudio), la cantidad de agua en el Origen aumenta de forma progresiva hasta alcanzar el Flujo Pico en el Tiempo Pico. A partir de entonces, el modelo genera un mapa de inundación cada 10 minutos hasta alcanzar el Tiempo Final.

El análisis exploratorio preliminar produjo los rangos de valores de los parámetros de entrada reportados en la Tabla I. El Modelo Basado en Agentes fue programado para realizar simulaciones explorando este rango de datos.

El modelo produjo un conjunto de 178 simulaciones de inundaciones potencialmente comparables a la del modelo HEC-RAS para un evento con un período de recurrencia de 50 años con un caudal máximo de 880 m<sup>3</sup>/s. La media de RMS de los mapas resultantes fue de 0.5224m con una desviación estándar de 0.15m (mín = 0.2835m, máx = 1.21m). La Figura 4 presenta la frecuencia de los valores de RMS para todas las simulaciones.

La simulación que presentó un mejor ajuste estuvo definida por un caudal de estabilización de 100m<sup>3</sup>/s, durante un tiempo de estabilización de 40 min, un flujo pico de 480 m<sup>3</sup>/s alcanzado a los 100 minutos y un tiempo final de simulación de 130 minutos. La Figura 5 muestra el mapa de inundación producido con el modelo basado en agentes luego de la calibración, así como el mapa de inundaciones producido con el modelo hidráulico HEC-RAS y la diferencia entre ambos.

La superficie total inundada de la simulación del ABM fue 41.1ha, mientras que la del modelo HEC-RAS fue de 49.8ha. Las diferencias entre las profundidades simuladas por el ABM con respecto a las de HEC-RAS se encuentran en un rango entre -1.3m y 2.1m. (media=-0.126, SD=0.326). Es importante notar que las diferencias mayores se dan en los bordes del modelo, mientras que en la zona central las diferencias son cercanas a cero.

**TABLA I**  
PARÁMETROS Y VALORES PARA LAS SIMULACIONES ABM

PARÁMETRO	MIN.	MÁX.	INTERVALO
Tiempo de Estabilización	30	90	10
Flujo Pico	380	880	20
Tiempo Pico	60	120	10
Tiempo Final	90	150	10

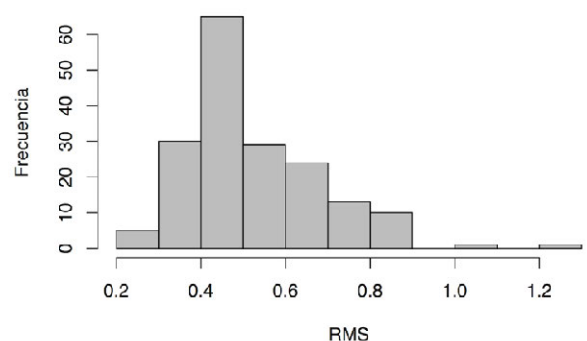


Figura 4. Frecuencia de los valores de RMS de las diferencias en metros entre las simulaciones y los resultados del Modelo Basado en Agentes y el modelo de referencia.



Figura 5. Izquierda: Mapa de inundaciones producido con el ABM calibrado. Centro: Mapa de inundaciones producido con el modelo hidráulico HEC-RAS. Derecha: Diferencia de las profundidades de inundación entre los dos modelos.

#### IV. CONCLUSIONES

En este artículo hemos presentado el proceso de calibración de un modelo basado en agentes (ABM) para la simulación de inundaciones por desborde de ríos comparándolo con un modelo hidráulico de referencia. Los resultados de una prueba piloto de calibración en el río Santa Bárbara (Gualaceo, Ecuador) indican que la simulación de inundaciones basada en el ABM es capaz de reproducir de manera general el resultado de la simulación de un modelo hidráulico de referencia implementado en HEC-RAS. Sin embargo, existen diferencias importantes entre ambas simulaciones, principalmente en los extremos geográficos del modelo, pues cerca del origen, el ABM tiende a subestimar la profundidad del agua, mientras que cerca de la salida, tiende a sobre-estimar. Este efecto podría deberse a que, a diferencia del modelo hidráulico basado en métodos numéricos de ecuaciones diferenciales, el ABM implementado es un modelo conceptual que no incorpora la fricción de los diferentes tipos de cobertura del suelo, haciendo que el agua fluya a una mayor velocidad, causando acumulación en las zonas de salida. Sin embargo, estas variables pueden ser incorporadas en el modelo y está planificado implementarlo en futuras versiones del mismo. La zona central del área de estudio es la que presenta las menores diferencias (aproximadamente  $\pm 0.1$  m) lo cual implica que en la práctica se podría ampliar el área de modelización más allá del área de estudio, logrando así que la zona central del modelo que presenta mayor estabilidad coincida con el área de interés. Esta recomendación, también es válida en los modelos hidráulicos:

tener una distancia adecuada al inicio y fin del tramo, de tal forma que la zona de interés no sea afectada por las condiciones de contorno.

A pesar de carecer de las características físicas de un modelo hidráulico bidimensional, la modelización de inundaciones basada en agentes representa una alternativa útil para la delimitación del área inundada y cuando no se requiera gran precisión de los resultados hidráulicos (p.e. profundidad, velocidad flujo, etc). Los ABM permiten implementar modelos conceptuales de comportamiento del agua con respecto a la topografía de manera directa y sencilla, logrando reproducir de manera relativamente adecuada los fenómenos de inundación por desborde de ríos. Además, la gran flexibilidad y posibilidades de automatización de los lenguajes ABM abren grandes posibilidades para estos modelos, por ejemplo, para realizar análisis de sensibilidad e incertidumbre. Es posible, por ejemplo, utilizar estos modelos para estudiar el efecto que tienen los errores de los datos de entrada (caudal y topografía) en los mapas de inundación utilizando métodos de Monte Carlo. Bajo la misma lógica, es posible utilizar los modelos ABM para producir mapas que no se limiten a reportar de forma binaria el riesgo de inundación (inundado/ no inundado), sino de forma probabilística (probabilidad de ser inundado), lo cual permite ampliar la comprensión sobre el riesgo y evaluar de forma más adecuada las prácticas de prevención y mitigación. El estudio de la propagación de errores y la creación de mapas de probabilidad de riesgo constituyen precisamente los próximos pasos de nuestra investigación.

### AGRADECIMIENTOS

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a la Dirección de Investigación de la Universidad de Cuenca a través del proyecto "Evaluación del riesgo de inundación en el Río Santa Bárbara". También agradecemos a la SENAGUA – Demarcación Hidrográfica del Santiago y al Municipio de Gualaceo por su valioso aporte con información de la zona de estudio. Finalmente agradecemos a Arend Ligtenberg y Sytze de Bruin del Laboratory for Geo-information and Remote Sensing de Wageningen University (Países Bajos), por el código base en NetLogo con el cual se desarrolló el modelo.

### REFERENCIAS

- Brunner, G. W. (2016). HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual. Retrieved from <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/documentation/HEC-RAS 5.0 2D Modeling Users Manual.pdf>
- Cook, A., & Merwade, V. (2009). Effect of topographic data, geometric configuration and modeling approach on flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 377(1), 131-142. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.08.015>
- Holland, J. H. (John H. (2000). *Emergence : from chaos to order*. Oxford University Press.
- Izquierdo, L. R., Galán, J. M., Santos, J. I., & Del Olmo, R. (2008). Modelado de sistemas complejos mediante simulación basada en agentes y mediante dinámica de sistemas. *Empiria. Revista de Metodología de Ciencias Sociales*, (16), 85. <https://doi.org/10.5944/empiria.16.2008.1391>
- MAGAP. (2012). SIGTIERRAS.
- Merwade, V., Olivera, F., Arabi, M., & Edleman, S. (2008). Uncertainty in Flood Inundation Mapping: Current Issues and Future Directions. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(7), 608-620. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:7\(608\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:7(608))
- Milly, P., Wetherald, R., Dunne, K., & Delworth, T. (2002). Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature*. Retrieved from <http://www.nature.com/nature/journal/v415/n6871/abs/415514a.html>
- QGIS Developing Team. (2016). QGIS. Open Source Geospatial Foundation. Retrieved from <http://qgis.osgeo.org>
- R Core Team. (2016). R: A Language and Environment for Statistical Computing. Vienna, Austria. Retrieved from <http://www.r-project.org/>
- Saksena, S., & Merwade, V. (2015). Incorporating the effect of DEM resolution and accuracy for improved flood inundation mapping. *Journal of Hydrology*, 530, 180-194. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.09.069>
- SENAGUA. (2014). Análisis de la vulnerabilidad a eventos de crecida y diseño de obras físicas para la protección de márgenes e infraestructura del río Santa Bárbara, Tomo 2: Estudio hidráulico, Demarcación Hidrográfica del Santiago.
- Timbe, L. M., & Timbe, E. P. (2012). Mapeo del peligro de inundación en ríos de montaña , caso de estudio del río Burgay. *Maskana*, 3(1), 87-96.
- Wechsler, S. P. (2007). Uncertainties associated with digital elevation models for hydrologic applications: a review. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11(4), 1481-1500. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1481-2007>
- Whiteaker, T. L., Robayo, O., Maidment, D. R., & Obenour, D. (2006). From a NEXRAD Rainfall Map to a Flood Inundation Map. *Journal of Hydrologic Engineering*, 11(1), 37. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2006\)11:1\(37\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2006)11:1(37))





# Morfología interpretativa de alta resolución usando datos LiDAR en la cuenca hidrográfica del río Paute en Ecuador

Sellers Chester<sup>1</sup>, Buján Sandra<sup>2</sup>, Corbelle Eduardo<sup>3</sup>, Miranda David<sup>4</sup>

1 Instituto de Estudios de Régimen Seccional del Ecuador/Universidad del Azuay  
Av. 24 de mayo 7-77/Azuay/Ecuador  
csellers@uazuay.edu.ec

2, 3,4 Laboratorio do Territorio/Universidad Santiago de Compostela  
27002 Lugo/Galicia/España  
laborate@usc.es

## RESUMEN

Este estudio aborda el análisis morfológico de la cuenca del río Cutilcay (provincia del Azuay, Ecuador), a partir de datos LiDAR y su integración en un Sistema de Información Geográfica (SIG) para la cuantificación de sus variables morfológicas. El análisis de los datos LiDAR, el estudio y la definición de los parámetros morfológicos útiles han permitido generar índices y parámetros que permiten caracterizar la cuenca. El estudio demuestra que los datos LiDAR permiten alcanzar resultados con alta precisión, asociada también a la obtención de modelos de terreno más precisos y visualmente más estilizados de los disponibles hasta el momento. Así, también se muestra la importancia de integrar esta tecnología para la generación de información que permita comprender la dinámica territorial de las cuencas hidrográficas en Ecuador.

Palabras clave: **Lidar, morfología, régimen hídrico, cuenca hidrográfica.**

## ABSTRACT

*This study addresses the morphological analysis of the Cutilcay river basin (Azuay province, Ecuador), based on LiDAR data and its integration into a Geographic Information System (GIS) for the quantification of its morphological variables. Analysis of the LiDAR data, the study and the definition of the useful morphological parameters have allowed the generation of indicator's and parameters that allow us to characterize the basin. This study demonstrates that the LiDAR data allows to achieve results with a high precision, also associated with the obtaining of more accurate and visually more stylized terrain models available to date. Thus, it is also shown the importance of integrating this technology for the generation of information to understand the territorial dynamics of watersheds in Ecuador.*

**Keywords: Lidar, morphology, water regime, hydrographic basin.**

## I. INTRODUCCIÓN

En los últimos años en Ecuador, la mayoría de instituciones, organizaciones sociales y productivas, así como la sociedad civil en general, han empezado a ver con mucha preocupación cómo avanza sin control la degradación de las cuencas hidrográficas en los diferentes contextos, sean estos locales, regionales, nacionales e internacionales, cuyos efectos inmediatos se visibilizan en la erosión acelerada de los suelos, la disminución de la producción y la vulnerabilidad hídrica.

De ahí que es fundamental realizar estudios de régimen hídrico, morfología general e inventario hídrico, entendidos como las herramientas para determinar las características de las fuentes, su extensión y calidad del agua para su utilización y control; pero a su vez, la disponibilidad en cantidad y calidad en determinado lugar y en un período de tiempo para satisfacer las demandas identificables (consumo multifinanciado, humano, agrícola, energético, etc.). Por tanto, un inventario debe ir más allá de la sola dimensión técnica, es decir, debe considerarse como el inicio de un proceso que impulsa la gestión integrada del agua. Por ello no se debe perder de vista, las estrategias de concertación y decisión política que deben llevarse a cabo por todos los actores de un espacio socio territorial.

Los mapas morfológicos difieren de los topográficos en que contienen un elemento de interpretación genética (Jones et al., 2007). Por ejemplo, a diferencia de lo que ocurre en los mapas topográficos, una rotura en pendiente no se muestra por un conjunto de contornos muy próximos entre sí, sino por una línea codificada que indica un cambio en el gradiente, en particular, en la forma de relieve.

Tradicionalmente, la obtención de cartografía geomorfológica implicaba salidas de campo buscando características de interés con el soporte de mapas a gran escala o fotografías aéreas (Jones et al., 2007; Metternicht et al., 2005) Además, la morfología de cuencas siempre ha contado con cartografía de baja resolución espacial, por ejemplo mapas topográficos escala 1:200.000, por lo que los datos derivados no son de gran precisión. A todo esto hay que añadirle los problemas inherentes a accesibilidad, tiempo y logística. Todas estas circunstancias dificultan el registro y actualización de la información.

La tecnología LiDAR (Ligth Detection and Ranging) permite obviar muchos de estos limitantes. Los datos LiDAR proporcionan una alta resolución espacial gracias a la densidad de puntos obtenida durante el levantamiento (considerándose alta resolución aquellos datos con 5 - 10 puntos por metro cuadrado, donde resoluciones más altas pueden obtenerse con vuelos comisionados) unida a una elevada precisión altitudinal; (considerada como alta precisión vertical aquella entre 10 cm ± 25 cm). El ratio de levantamiento (área / tiempo) versus métodos tradicionales, son una de las ventajas más importantes que presentan los levantamientos LiDAR, llegando a levantar hasta 90 km<sup>2</sup> en una hora (Suárez et al., 2005). Estas ventajas a su vez están reforzadas en la actualidad por los SIG, que permiten que los datos LiDAR sean procesados y visualizados de forma rápida y eficiente.

En la actualidad, se trata de una de las tecnologías más empleadas para la adquisición de datos terreno. Esto a su vez repercute en la aparición de nuevas aplicaciones para esta información, entre las que se encuentran la generación de Modelos Digitales de Terreno (MDT), Modelos Digitales de Superficie (MDS), caracterización morfométrica de cuencas, entre muchas otras.

Este estudio pretende ser la base de partida de una investigación doctoral para la modelización predictiva e investigación

del riesgo de inundación en cuencas, sub-cuencas y micro cuencas andinas, específicamente la cuenca del río Paute en Ecuador (Figura 1). Los datos de base LiDAR para la modelización fueron obtenidos por medio de la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), organismo estatal que tiene la competencia del manejo de cuencas hidrográficas en Ecuador. Los datos corresponden al Proyecto para el Uso Multifinanciado del Agua (PUMA), el cual incluye la micro-cuenca del río Cutilcay. Esta es una de las micro-cuencas más importantes dentro del sistema, y además reúne todas las características representativas de la típica micro-cuenca dentro del subsistema de la cuenca del río Paute.

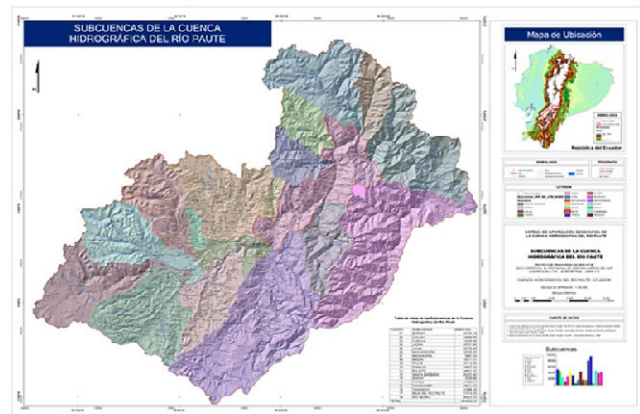


Figura 1.- Ubicación general sub cuenca río Paute

El elemento básico de cualquier representación digital de la superficie terrestre son los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE). Constituyen la base de muchas aplicaciones en ciencias de la tierra, ambientales y las ingenierías. Un MDE es un modelo digital de una superficie topográfica representada por puntos regulares o irregulares con valores de elevación (Moreno Brotóns et al., 2010; Höhle y Potuckova, 2011). Dentro de este tipo de modelos se encuentran los Modelos Digitales del Terreno (MDT, los cuales representan la superficie topográfica libre de objetos, es decir, representan al terreno (suelo) (Höhle y Potuckova, 2011).

Por otro lado, un Modelo Digital de Superficie (MDS) es la presentación digital topográfica de puntos regulares o irregulares representando los objetos sobre el terreno, por ejemplo vegetación o edificaciones (Höhle y Potuckova, 2011).

Los métodos para generar un MDT pueden clasificarse en dos grupos (Moreno Brotóns et al., 2010; Nelson et al., 2009):

- Métodos directos, topografía tradicional o con GPS.
- Métodos basados en sensores remotos, fotogrametría o más recientemente radar y LiDAR.

Los métodos directos son más exactos y precisos, pero caros y limitados a poca superficie. Los métodos basados en sensores remotos permiten abarcar mayor extensión, aunque con una exactitud menor. Tradicionalmente, el método más habitual para generar un MDT ha sido la interpolación a partir de curvas de nivel digitalizadas de mapas topográficos. Para la micro-cuenca del Cutilcay, la información de mejor escala disponible corresponde a 1:25 000.

### TECNOLOGÍA LIDAR

LiDAR es un sistema láser activo, montado generalmente sobre una aeronave, capaz de emitir pulsos de luz láser en la banda del espectro electromagnético entre el ultravioleta y el infrarrojo cercano (500 - 1500 nm). Posteriormente la señal

reflejada por la superficie barrida es capturada y se calcula el tiempo empleado por cada una de las señales emitidas (pulsos) en recorrer el espacio que separa al transmisor de la superficie del terreno. El tiempo medido junto con la velocidad de la luz permiten calcular la distancia entre el sensor y la superficie terrestre. Un receptor GPS proporciona la posición y la altura del avión en cada momento, y un sistema inercial (INS) informa de los giros del avión y su trayectoria. Se obtiene así de forma casi instantánea una nube muy densa de puntos georreferenciada cuyas coordenadas (x, y, z) quedan registradas con gran precisión (Baltsavias, 1999; Hodgson et al., 2005). Los errores de medición están en torno a 15 y 25 cm en altimetría y 50-100 cm en planimetría, siendo estos muy dependientes del relieve del terreno y el equipo utilizado (Nelson et al., 2009).

Adicionalmente al registro de coordenadas, los sensores LiDAR registran valores de intensidad. La intensidad es el cociente entre la cantidad de energía retro-dispersada procedente de los objetos, captada por el sensor, y la cantidad de energía total emitida (Song, Han, Yu, & Kim, 2002).

Los productos fundamentales generados a partir de datos LiDAR según algunos autores (Liu et al., 2007; Baltsavias, 1999) son:

- Modelo Digital del Terreno: obtenido de la interpolación de puntos identificados como pertenecientes al terreno (base de la modelización hidrológica/hidráulica).
- Modelo Digital de Alturas de Objetos: obtenido de la diferencia del modelo digital de superficies y el MDT. Este modelo proporciona la altura de los objetos sobre el terreno.
- Imagen de intensidades: A partir de valores de intensidad asociados a cada punto y mediante un proceso de interpolación se obtiene una imagen de intensidades semejante a la banda del infrarrojo de las ortoimágenes o imágenes de satélite.

#### CARACTERIZACIÓN DE ERRORES EN UN MDT

Un MDT es la representación visual y matemática de valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve. En los MDT existen dos cualidades esenciales: la precisión vertical/horizontal, y la resolución espacial. Ambas cualidades varían dependiendo del método usado para generar el MDT. Como cualquier otro conjunto de datos espaciales, tiene errores, afectando también sus aplicaciones y usos.

Estos errores en el MDT pueden estimarse comparando un conjunto de valores conocidos de altitudes versus los correspondientes valores en el modelo (Höhle y Höhle, 2009). Según Höhle y Höhle (2009), si se asume una distribución normal de datos y no hay valores atípicos (outliers), se puede aplicar un conjunto de estadísticos para evaluar este error. Habitualmente el error medio cuadrático, media del error y la desviación típica. De lo contrario, si los datos no siguen una distribución normal se deberían usar estadísticos robustos, menos sensibles a los efectos generados por outliers; por ejemplo cuantiles muestrales de la distribución del error (Höhle y Höhle, 2009). Los cuantiles muestrales son estimadores no paramétricos de la distribución basados en muestras de observaciones independientes ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) de la distribución.

Por tanto, si los datos siguen una distribución normal, el error medio cuadrático es el descriptor tradicional más utilizado para cuantificar los errores en un MDT. Este estadístico tiene como principales inconvenientes que requiere valores de elevación real (puntos de control campo) y que no informa

acerca de la distribución espacial de los errores y su posible autocorrelación (Moreno Brotóns et al., 2010; Meng et al., 2010; Felicísimo, 1994). La directiva INSPIRE (Infrastructure for Spatial Information in Europe) menciona que cuando se conoce a priori el valor terreno de referencia ( $Z_t$ ) se puede utilizar el método del error medio cuadrático, que se define en la fórmula 1.

$$\sigma^2 = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Z_{mi} - Z_t)^2}$$

Formula 1.- Error Medio Cuadrático

Dónde:

- N Tamaño de la muestra
- $Z_{mi}$  El valor obtenido de la muestra en un punto.
- $Z_t$  El valor terreno de referencia.

#### MORFOMETRÍA DE CUENCAS

El estudio de las características morfométricas se inició con el padre de la hidrología moderna en los Estados Unidos de Norte América, Robert Hermer Horton a través de dos artículos de referencia internacional, Drainage basin Characteristics (Horton, 1932) y Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology (Horton, 1932). Estos estudios fueron transformados de diferentes análisis puramente cualitativos y deductivos, a estudios científicos, cuantitativos y rigurosos capaces de suministrar datos hidrológicos fáciles de estimar (Strahler, 1957).

En 1952, Arthur Newell Strahler, modificó y mejoró el sistema para el análisis de red propuesto originalmente por Horton, donde se clasifican los órdenes de los cauces de acuerdo a su jerarquía y a la potencia de sus afluentes. Convirtiéndose en uno de los sistemas de clasificación más utilizados mundialmente.

Es fundamental la comprensión de parámetros y coeficientes en el concepto de cuenca hidrográfica: Entendiéndose por cuenca hidrográfica el área o superficie del terreno que aporta sus aguas de escorrentía a un mismo punto de desagüe (Wani y Garg, 2009). Esta transformación depende de las condiciones climáticas y características físicas de la cuenca (Horton, 1945; Horton, 1932).

La morfometría de cuencas se considera una de las herramientas más importantes en el análisis hídrico (Patton y Baker, 1976). El propósito es determinar índices y parámetros que permiten conocer la respuesta hidrológica y el comportamiento en esta unidad de análisis. Se trata por tanto del estudio cuantitativo de las características físicas de una cuenca hidrográfica, y es de gran importancia en el análisis de la red de drenaje. También resulta de gran utilidad ya que permite el estudio de la semejanza de los flujos de diferentes tamaños (García Ruiz et al., 1987) con el propósito de aplicar los resultados de los modelos elaborados a pequeña escala a prototipos de gran escala (Splinter et al., 2011).

Otro aspecto interesante reside en los objetivos fundamentales de estos estudios, dirigidos a inferir posibles picos de crecidas o avenidas en caso de tormentas, cuyas repercusiones de tipo socio-económico motivan especial atención a la hora de utilizar y ocupar el territorio, o en el momento de definir medidas de tipo estructural para el control de crecidas.

La influencia de estos factores sobre la transformación de la precipitación en escorrentía es deducible cuantitativamente. Es posible definir cierto número de índices, susceptibles de

servir, al menos de referencia, en la clasificación de cuencas y facilitar los estudios de semejanza (Strahler, 1957; Strahler, 1952). Las propiedades morfométricas de una cuenca proporcionan una descripción física espacial permitiendo realizar comparaciones entre distintas cuencas. Además proporcionan conclusiones preliminares sobre las características ambientales del territorio. La morfometría particular de cada cuenca hidrográfica es proporcional a la posibilidad de cosecha hídrica; ante eventos climáticos, posibles respuestas a los mismos, escorrentía superficial, expresada en términos de caudales, incidencia en el transporte de sedimentos y nutrientes a lo largo de los ecosistemas que la integran. Actualmente, herramientas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), procesos de interpretación de imágenes satelitales, permiten realizar la caracterización espacio temporal de las propiedades morfométricas de las cuencas hídricas y de las redes de drenaje.

El análisis de características morfométricas funcionales de una cuenca por parámetros de forma, relieve y red de drenaje es básico en la modelación hidrológica (Strager et al., 2010; Montgomery et al., 1998). Estos parámetros son muy importantes en el estudio y comportamiento de los componentes del ciclo hidrológico.

## II. MÉTODO

### ÁREA DE ESTUDIO Y DATOS

La micro-cuenca Cutilcay (Figura 2) localizada en el cantón Paute provincia de Azuay, Ecuador, tiene un área de 485,6 ha, abastece a 8 sistemas de agua potable, 6 corresponden a las comunidades de la micro-cuenca con una población de 662 familias (un sistema abastece a la comunidad de Plaza Pamba que está fuera del perímetro de la micro cuenca, 80 familias, el sistema de agua potable del centro urbano de Paute con 1 253 familias). La micro cuenca en total provee de agua para consumo humano a 1 995 familias.

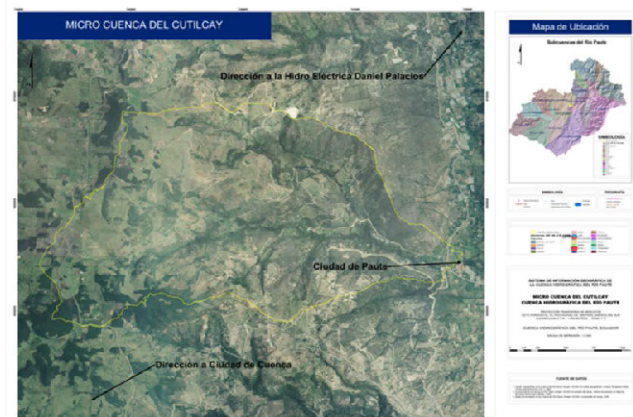


Figura 2.- Micro cuenca río Cutilcay

### DATOS LIDAR

Los datos LiDAR empleados en este proyecto fueron capturados con un sensor Leica ALS50 II en el mes de Agosto del 2012 (Tabla I).

TABLA I  
CARACTERÍSTICAS SENSOR LIDAR

Sensor de Captura de Datos LiDAR	
Sensor	ALS50 II
Número de serie	SN 48
Altura de vuelo	200m - 6 000m
Frecuencia de pulsación	Hasta 150 000 Hz ( 150 000 pulsos/seg)
Precisión a priori	Hasta 10cm en altimetría
Número de retornos	4
Campo de visión (FOV)	10°- 75°
Captura de intensidades	Una por pulso
Tecnología MPiA (Multiple Pulses in Air)	Si
Densidad de puntos (puntos / m <sup>2</sup> )	Hasta 12

### ORTO-IMÁGENES

Las imágenes empleadas corresponden a ortofotografía escala 1:5000 generada a partir de la toma de fotografía aérea 1:20000 con un GSD (Ground Sample Distance) de 30 cm, para la zona sierra de Ecuador.

En la Figura 3 se presenta el flujo de trabajo para el procesamiento de los datos.

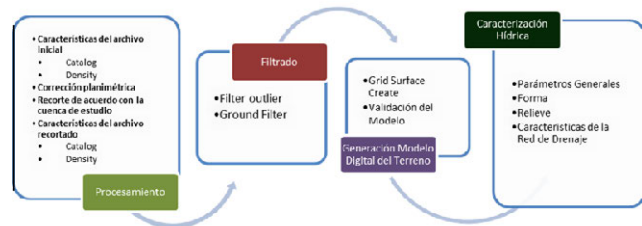


Figura 3.- Orden metodológico de actividades

### PROCESAMIENTO DATOS LIDAR

#### Características archivos LiDAR iniciales

El primer paso para trabajar con datos LiDAR es conocer las características de éstos. En este estudio se han realizado dos análisis empleando el software libre FUSION: caracterización general de datos (Catalog), y un análisis de la distribución de puntos (Switch de la herramienta Catalog-Density).

Catalog.- Utilizando el comando Catalog de FUSION producimos un conjunto de informes que describen varias e importantes características de los datos LiDAR: valores de coordenadas máximas y mínimas, elevación máxima registrada, número de puntos registrados, densidad nominal de retornos en cada pasada, etc.

Switch: density.- Asimismo tiene una opción adicional denominada Density, la cual permite crear una imagen donde cada pixel almacena el número de retornos LiDAR en esa localización. Conjuntamente con la imagen se presenta una tabla resumen de densidades codificada por colores.

#### Corrección Planimétrica

El correcto acoplamiento entre diferentes pasadas es de suma importancia en fotogrametría y en el empleo de datos procedentes de sensores remotos en general, y más aún en el campo de los levantamientos mediante sensores LiDAR. Existen métodos para acometer este propósito, por ejemplo procedimientos de filtrado y suavizado, segmentación y clustering (Bakula et al., 2014; Höhle y Øster Pedersen, 2010; Wu et al., 2008).

Para llevar a cabo la corrección se establecieron una serie de polígonos representativos, claramente identificables en zonas de solapamiento entre pasadas. El primer grupo de polígonos, considerados “verdad terreno”, se obtuvo digitalizando sobre la ortoimagen en verdadera proyección (“true orto”) (Figura 4a). Posteriormente, los polígonos fueron digitalizados sobre cada MDS derivados de las pasadas (Figura 4b). Seguido, se estableció el centroide de cada polígono para los dos grupos, calculándose las diferencias entre centroides “verdad terreno” y los derivados de los MDS (Ilustraciones 4c y 4d), corrigiendo el desplazamiento en base a los valores obtenidos. Para realizar este proceso se utilizó el software propietario ESRI® ArcMap™ 9.3.

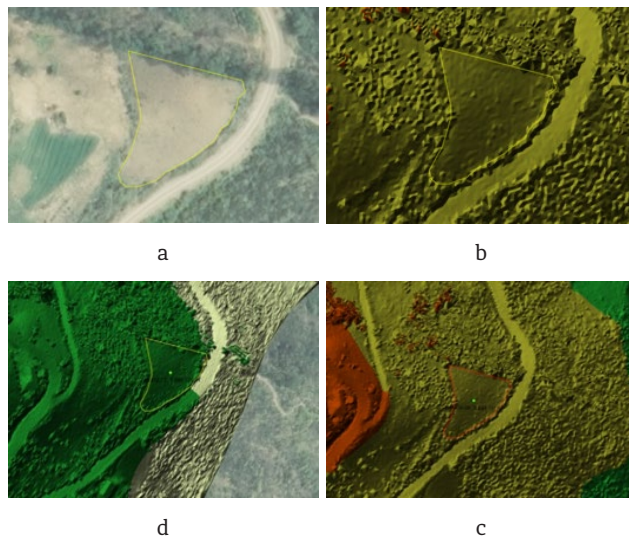


Figura 4.- Identificación y digitalización de áreas comunes entre las pasadas 38 y 41: a) Digitalización true orto; b) Comparación con MDT; c) Área y centroide pasada 41; d) Área y centroide pasada 38

**Corrección Altimétrica**

Para la corrección altimétrica se realizó un ajuste fino por mínimos cuadrados. Este procedimiento parte de la selección de varios polígonos semejantes en los TIN´s generados para cada pasada que se solapa. Usando los polígonos creados para el proceso de rectificación planimétrica se extraen los puntos LiDAR y se obtienen a partir de los valores de sus coordenadas (x, y, z) la media, mediana, desviación típica y el error medio cuadrático. De los resultados de cada pasada se determinan sus diferencias y se realiza el ajuste altimétrico (Bakula et al., 2014; Wu et al., 2008; Kraus y Pfeifer, 2001).

**Recorte Información**

Utilizando el software FUSION se procede con el corte de datos en el contorno aproximado de la cuenca, y un archivo de tipo shape correspondiente a la delimitación a nivel 6 pfafstetter<sup>1</sup> perteneciente a la delimitación hidrográfica de Santiago (SENAGUA).

**GENERACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MDT**

Los datos resultantes del recorte son sometidos a dos tipos de filtros: el primero, FilterData, para eliminar valores anómalos (outliers), mientras que el segundo

Groundfilter se emplea para seleccionar puntos terreno. Seguidamente se genera el MDT utilizando el comando de FUSION GridSurfaceCreate, mediante el cual se obtiene una superficie continua a partir de un conjunto discreto de puntos mediante un proceso de interpolación. Los comandos mencionados se detallan a continuación:

**FilterData.** Genera un nuevo archivo de datos con los retornos que cumplan los requisitos establecidos por el filtro. El uso más común es eliminar outliers de los archivos LiDAR. Tiene tres parámetros principales: tipo de filtro a usar (FilterType), en este caso outlier; FilterParms, para el caso particular del filtro outlier corresponde con el multiplicador aplicado a la desviación estándar, de tal forma que se eliminarán aquellos retornos cuya elevación supere el umbral derivado de: elevación media ± FilterParms \* desviación estándar de las elevaciones; y WindowSize, tamaño de la ventana usado para calcular la media y desviación estándar de las elevaciones.

**GroundFilter.** Esta herramienta permite filtrar la nube de datos e identificar puntos terreno. Emplea el algoritmo de predicción lineal, adaptación del desarrollado por (Kraus y Pfeifer, 1998). En este estudio se utilizaron los parámetros por defecto, con una ventana de filtrado de 5 metros y 8 iteraciones.

**GridSurfaceCreate.** Crea un modelo de superficie regular usando colecciones de puntos aleatorios. El modelo de superficie se almacena en formato DTM (Data Terrain Model).

*Validación modelo.*

Para cuantificar el error introducido en la generación del MDT se han utilizado las zonas de muestreo DGPS, y datos obtenidos mediante selección de puntos terreno LiDAR en la ortofotografía. La cuantificación del error se obtuvo comparando el conjunto real de valores elevación con los obtenidos del modelo generado. El error en elevación en un punto i está definido como la diferencia entre la elevación del punto en el modelo zi y su valor real z(i), calculando el Error Medio Cuadrático (EMC).

**CARACTERIZACIÓN RÉGIMEN HÍDRICO (MORFOMETRÍA)**

*Descripción general de la cuenca*

La micro-cuenca de Cutilcay, situada en el término provincial del Azuay, parroquia Paute pertenece a la cuenca del rio Paute inmersa en la demarcación hidrográfica de Santiago zonal 6 (Tabla II).

**TABLA II**  
DATOS GENERALES MICRO-CUENCA

Nombre de la cuenca	Termino municipal	Codificación UH Pfafstetter						Punto desagüe	
		Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5	Nivel 6	Coor UTM X	Coor UTM Y
Cutilcay	Paute	4	49	9	8	2	5	747709,9	9693410,79

*Parámetros generales*

Recogen los aspectos básicos que representan la cuenca, constituyen la información mínima básica necesaria para conocer la naturaleza, características y comportamiento de la micro-cuenca. A continuación se especifican los parámetros generales tenidos en cuenta en este estudio:

**Área de la cuenca.** La micro-cuenca está definida por el espacio delimitado por la curva del perímetro. La divisoria de aguas de naturaleza topográfica representa una línea imagi-

<sup>1</sup> Proceso consistente en delimitar unidades hidrográficas dividiendo y codificando jerárquicamente las unidades por tipología: cuenca, sub-cuenca y micro-cuenca interna, desde el ámbito continental (Nivel 1), hasta los niveles 2, 3, 4, 5 y 6 en todo el territorio de la Cuenca Amazónica (SENAGUA).

naría que separa laderas opuestas de un punto de elevación, en donde las aguas de escorrentía de cada ladera fluyen a cauces diferentes (Beven y Kirkby, 1979).

Se representa por:

Área (A) (Km<sup>2</sup>): Superficie encerrada por la divisoria de aguas.

**Perímetro de la cuenca.** Informa sucintamente sobre la forma de la cuenca. Para una misma superficie, los perímetros de mayor valor, se corresponden con cuencas alargadas, mientras que los de menor valor se corresponden con cuencas redondeadas. Se considera como la longitud de los contornos de la cuenca y está ligada a la irregularidad del lugar a estudiar (Beven y Kirkby, 1979; Strahler, 1957; Horton, 1945).

Se representa por:

Perímetro (P) (km): Medición de la línea envolvente de la cuenca hidrográfica, por la divisoria de aguas topográficas.

**Longitud Axial.** Viene definida por la longitud del cauce principal, siendo equivalente a la distancia recorrida entre el de desagüe de la cuenca y el punto situado a mayor distancia topográfica aguas arriba (Tarolli y Dalla Fontana, 2007; Strahler, 1957; Horton, 1945).

Se representa por:

Longitud Axial (La) (km): Distancia existente entre la desembocadura y el punto más lejano de la cuenca. Es el eje de la cuenca.

**Ancho de la cuenca.** Se define como la relación entre el área y la longitud de la cuenca.

Se representa por:

Ancho promedio (Ap) (km): Relación entre la superficie de la cuenca y la La .

**Ancho nominal.** Generado a partir de la identificación del punto donde el ancho de la cuenca obtiene el valor más elevado.

Se representa por:

Ancho nominal (An) (km): Selección del punto donde la cuenca alcanza el ancho máximo.

**Cota máxima y mínima.** Selección de las cotas máxima y mínima dentro del contorno de la cuenca.

**Desnivel de altitudinal.** Se define por el valor obtenido de la diferencia entre la cota máxima y mínima del área de estudio.

Se representa por:

Desnivel Altitudinal (DA) (msnm): Valor de la diferencia entre la cota más alta de la cuenca y la más baja.

$$DA=HM-Hm$$

Formula 2.- Densivel Altitudinal

**Altitud media.** Valor muy importante para los estudios de análisis hídricos, siendo la altura de carga hipotética potencial que influye sobre los volúmenes de exceso de lluvia, considerándose como si estuvieran uniformemente distribuidas sobre la superficie.

#### Parámetros de forma

La forma de la cuenca es determinante para entender su comportamiento hidrológico. Cuencas con la misma área pero de diferentes formas presentan respuestas hidrológicas e hidrogramas diferentes. Los parámetros de forma tomados en cuenta son:

**Factor forma.** El factor o relación de forma de Horton indica cómo se regula la concentración de escorrentía superficial. (Jardí, 1985; Strahler, 1957; Strahler, 1952). Este factor manifiesta la tendencia de la cuenca a crecidas: cuando el factor forma (Rf) es similar a 1, representa una cuenca de forma redondeada (Tabla III); la cuenca con Rf bajo, se caracteriza por ser una cuenca alargada, con un colector de mayor longitud que la totalidad de los tributarios, sujeta a crecientes de menor magnitud; o una cuenca de forma triangular, con dos vértices en las cabeceras, afluentes de similar longitud y sincronismo en la llegada, provocará crecidas más significativas.

Se representa por:

Factor de forma (Rf): Relación entre el ancho promedio de la cuenca y la La. Es un factor adimensional.

$$Rf = \frac{A}{La^2}$$

Formula 3.- Relación de Forma Horton

Los valores interpretativos del factor de forma de Horton, Tabla III:

**TABLA III**  
RELACIÓN FORMA HORTON (STRAHLER, 1957).

Rango de Valores	Forma de la cuenca
< 0,22	Muy alargada
0,22 - 0,30	Alargada
0,3 - 0,37	Ligeramente alargada
0,37 - 0,45	Ni alargada ni ensanchada
0,45 - 0,60	Ligeramente ensanchada
0,60 - 0,80	Ensanchada
0,80 - 1,12	Muy Ensanchada
> 1,20	Rodeando el desagüe

**Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc).** Define la forma y la superficie que abarca la cuenca, teniendo influencia sobre la escorrentía y la marcha del hidrograma resultante de una precipitación (de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957). El Kc es adimensional y permite relacionar el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área equivalente al de la cuenca, y de esta manera representar esta característica (Gaspari et al., 2009; Strahler, 1957). Para explicar el Kc de una cuenca, se ha propuesto su comparación con una cuenca ideal de forma circular (Tabla IV), con sus tributarios dispuestos radialmente y que desembocan en el punto central (Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957).

Se representa por:

Coefficiente de compacidad de Gravelius (Kc): Relación entre perímetro (km) y la superficie (km<sup>2</sup>).

$$Kc = \frac{P}{(2\sqrt{\pi A})}$$

Formula 4.- Coeficiente de compacidad Gravelius.

El Kc está relacionado con el tiempo de concentración, tiempo que tarda una gota de lluvia en moverse desde la parte más lejana de la cuenca hasta la salida. En este momento ocurre la máxima concentración de agua, puesto que están llegando gotas de lluvia de todos los puntos de la cuenca. Según el valor que tome este coeficiente, la cuenca tendrá diferente forma.

**TABLA IV**  
TABLA ÍNDICE COMPACIDAD GRAVELIUS.

Índice Kc	Descripción
1 - 1,25	Redonda - ovalo redonda
1,25 - 1,5	Ovalo redonda - ovalo oblonga
1,5 - 1,75	Ovalo oblonga - rectangular oblonga
> 1,75	Rectangular Oblonga - Muy lobuladas

A medida que su Kc tiende a 1, es decir cuando tiende a ser redonda, la peligrosidad de la cuenca a las crecidas es mayor, las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presenta diferencias mayores y el tiempo de concentración es menor, por lo tanto mayor será la posibilidad de que las ondas de crecidas sean continuas (Strahler, 1957; Horton, 1932).

**Parámetros de relieve.** Los parámetros de relieve son de gran importancia, presentando más influencia sobre el comportamiento hidrológico que los parámetros de forma, y de forma general, de tal manera a mayor relieve o pendiente, los procesos de escorrentía se producen en tiempos menores.

**Pendiente media de cuenca (PM).** El proceso de degradación al que se ve sometida una cuenca hidrográfica, al igual que el caudal máximo, muy influenciado por la configuración topográfica, debido a que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo a los distintos grados de pendiente (Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957).

**Pendiente media del cauce (j).** La velocidad de escorrentía de las corrientes de agua en una cuenca hidrográfica depende de la pendiente de los canales fluviales. Cuanto mayor pendiente, mayor velocidad de flujo, por tanto, se convertirá en un factor característico del tiempo de respuesta de la cuenca ante determinada precipitación. (Gaspari et al., 2009; Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957). Tabla V rangos de pendiente por Strahler (1957a).

Se representa por:

Pendiente media del cauce (j): Relación entre desnivel altitudinal de la cuenca (DA) en Km y la longitud del cauce principal (Ln) en Km.

$$j = \frac{DA}{Ln}$$

Formula 5.- Pendiente media del cauce.

**TABLA V**  
VALORES COMPARATIVOS PENDIENTE MEDIA.

Pendiente media %	Tipología del terreno
<0,5	Muy Plano
0,5 - 1	Plano
1 - 3	Suave
3 - 12	Accidentado medio
12 - 20	Accidentado
20 - 50	Fuertemente accidentado
50 - 75	Escarpado
> 75	Muy escarpado

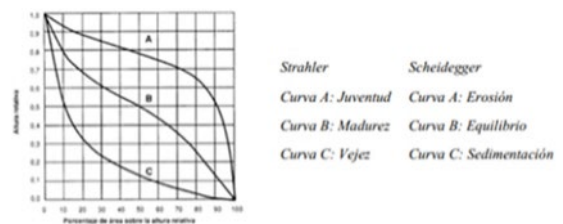
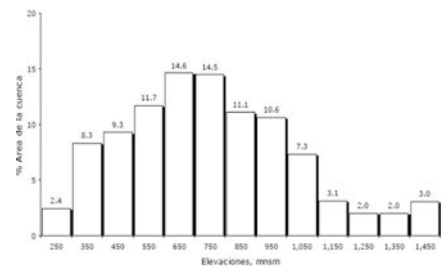


Figura 5.- Descripción forma de curva (Scheidegger, 1991; Strahler, 1957; Strahler, 1952).

**Histograma frecuencias altimétricas.** Es la representación de la superficie en km<sup>2</sup> (o en porcentaje), comprendida entre dos cotas. La representación de varios de estos niveles da lugar al histograma de frecuencias altimétricas (Figura 6).



**Características de la red de drenaje**

**Longitud del cauce principal (Ln).** Definida por la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan la cuenca expresada en Km.

**Densidad de drenaje (Dd).** Definida para cada cuenca como la relación entre la suma de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca con respecto al área de la misma. Caracteriza cuantitativamente la red hidrográfica de la cuenca, por el grado de relación entre el tipo de red y la clase de material predominante (Gaspari et al., 2009; Wani y Garg, 2009; de Llano y Mintegui Aguirre, 1986; Strahler, 1957). En general, una mayor densidad de escorrentía indica mayor estructuración de la red o bien mayor potencial erosivo.

Se representa por:

Densidad de drenaje (Dd) establecida por Horton: cociente entre el sumatorio de las longitudes de todos los cursos de agua que drenan la cuenca (Ln) y el área total de la cuenca (A).

$$Dd = \frac{L}{A}$$

Formula 6.- Densidad de drenaje.

En la Tabla VI se establecen factores de densidad drenaje de cuencas según Strahler / Horton.

**TABLA VI**  
DENSIDAD DE DRENAJE

Densidad de Drenaje (Km/Km <sup>2</sup> )	Categoría
< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
> 3	Muy Alta

Sin tener en cuenta otros factores del medio físico, cuanto mayor sea la densidad del drenaje, más rápida será la respuesta de la cuenca frente a una tormenta, evacuando el agua en menos tiempo.

Tiempo de concentración (Tc). Tiempo que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca y depende de la forma de la cuenca. A partir de información antecedente de siete cuencas rurales estadounidenses, con canales bien definidos y pendientes pronunciadas, se desarrolló una ecuación empírica (Chow et al., 1994; Kirpich, 1940) (Formula 7).

Se representa por:

$$T_c = 0.01947 L^{0.11} S^{-0.385}$$

Formula 7.- Tiempo de concentración.

Donde: TC es el tiempo de concentración en minutos; L la longitud del canal desde aguas arriba hasta la salida en metros y S la pendiente promedio de la cuenca en metros.

Relación de bifurcación (Rb). Permite inferir sobre posibles crecidas en el sistema. Valores bajos de esta relación se asocian con cuencas muy bien drenadas que a su vez pueden generar crecidas más violentas (Strahler, 1957; Horton, 1945). El valor típico, se establece entre 3 y 5 en cuencas donde la estructura geológica no distorsione el patrón de drenaje natural (Strahler, 1957).

$$R_b = \frac{Nu}{Nu + 1}$$

Formula 8.- Relación de bifurcación.

Donde Nu es la cantidad (sumatorio de ocurrencias) de una clase u orden.

Perfil longitudinal. El perfil longitudinal de un río es la línea obtenida a partir de la representación gráfica de las diferentes alturas desde su nacimiento hasta su desembocadura.

Jerarquización red fluvial. Permite obtener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. El orden de los cauces se relaciona con el caudal relativo a un segmento de un canal. En el método Strahler/

Horton, la codificación de cada segmento va en función del número de afluentes. Cada canal tiene un único orden que se corresponde con el mayor que puede tener al final de su recorrido (Strahler, 1957; Horton, 1945).

Orden de la cuenca. Refleja el grado de ramificación del sistema. Un cauce se une con otro de orden mayor; el canal resultante aguas abajo retiene el mayor de los órdenes. El orden de la cuenca es el mismo que el de su cauce principal a la salida (Figura 7).



Figura 7.- Orden de cauces (Strahler, 1957)

### III. RESULTADOS

#### RESULTADOS PROCESAMIENTO PREVIO DATOS LIDAR

Un primer resultado fueron las estadísticas de los archivos LiDAR originales, que presentan una densidad nominal media de 1,74 puntos/m<sup>2</sup> tomando en cuenta todos los archivos (Figura 8). Los 12 archivos LiDAR que representan la cuenca contienen 19.387.313 puntos en total.

Filename	Minimum X	Minimum Y	Minimum Elevation	Maximum X	Maximum Y	Maximum Elevation	Total Returns	Nominal Return Density
CATFM\cutilcay\cutilcay16.las	746684,23	9692709,36	2226,47	748243,49	9693714,89	2710,16	1,039,338	0,66
CATFM\cutilcay\cutilcay14.las	744143,97	9693805,19	2254,7	748274,22	9694735,84	31133,44	3,771,084	0,98
CATFM\cutilcay\cutilcay17.las	744293,31	9694332,51	2314,2	747819,19	9695170,24	3368,43	2,458,098	0,83
CATFM\cutilcay\cutilcay18.las	744688,75	9695005,13	2666,19	746694,91	9695184,2	3088,27	495,004	1,38
CATFM\cutilcay\cutilcay22.las	744109,81	9693521,55	2254,13	748274,07	9694491,93	3130,76	3,812,674	0,94
CATFM\cutilcay\cutilcay29.las	748185,07	9692507,45	2228,44	748215,43	9692582,89	2242,79	7,079	3,09
CATFM\cutilcay\cutilcay30.las	747826,22	9692507,4	2221,56	748227,73	9693522,48	2300,76	281,072	0,69
CATFM\cutilcay\cutilcay31.las	747472,8	9692507,63	2220,4	748274,2	9694055,93	2415,02	723,513	0,58
CATFM\cutilcay\cutilcay32.las	747187,36	9692512,8	2223,78	748273,84	9694263,95	2556,44	1,200,982	0,63
CATFM\cutilcay\cutilcay33.las	746935,67	9692534,47	2234,47	748273,77	9694452,94	2660,08	1,670,039	0,65
CATFM\cutilcay\cutilcay35.las	746340,54	9692512,99	2278,83	747851,98	9694437,35	2809,55	1,760,929	0,61
CATFM\cutilcay\cutilcay39.las	744193,41	9692650,87	2870,05	745777,09	9695178,81	3167,54	2,167,501	0,54
<b>Overall (12 files)</b>	<b>744109,81</b>	<b>96922507,4</b>	<b>2220,4</b>	<b>748274,22</b>	<b>9695184,2</b>	<b>3368,43</b>	<b>19,387,313</b>	<b>1,74</b>

Class value	# returns	Interpretation
0	0	Created, never classified
1	19,387,313	Unclassified
2	0	Ground
3	0	Low Vegetation
4	0	Medium Vegetation
5	0	High Vegetation
6	0	Building
7	0	Low Point (noise)

Figura 8.- Resultado comando Catalog.



El Switch Density devolvió la densidad de puntos/m<sup>2</sup> en formato ráster. La Figura 9 muestra el resultado de la pasada número 14. Las celdas con densidades de puntos dentro del rango mínimo-máximo además de los lugares donde no existe información (Figura 10).

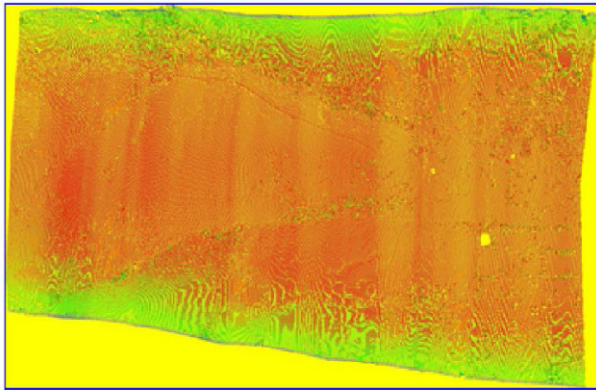


Figura 9.- Resultado Catalog/Density pasada 14.

Return Density			
Density computed using a cell that is 1.00m by 1.00m units (1.00 square meter)			
Density range is 2266666.67 to 1100 columns. Catalog_name: density_14			
Minimum return density (returns per square meter)	1.00		
Maximum return density (returns per square meter)	1100		
Average return density (returns per square meter)	1.71		
Standard deviation of return density (returns per square meter)	1.90		
Factor	Overlapping		
Cells with no points (could be outside coverage area)	75	Percentage of Area with Data	Percentage of Total
Density less than minimum specification (less than 2.00 points per square meter)	70.57	92.87	56.11
Density more than maximum specification (2.00 to 3.00 points per square meter)	39.43	49.13	30.89
Density exceeds specification (more than 3.00 points per square meter)	1.03	1.28	0.61

Figura 10.- Resultado Catalog/Density pasada 14.

Para la rectificación del desplazamiento entre pasadas, se realizó un proceso de corrección planimétrica. En un primer paso y mediante los resultados de las diferencias entre centroides de polígonos identificados como comunes entre pasadas, se establecieron los valores de los vectores de cambio. Un ejemplo se presenta en la Tabla VII. En este caso, el desplazamiento registrado de la pasada 41 en la coordenada x es de 8,12 m mientras que en la coordenada y es de 15,46 m.

TABLA VII  
CORRECCIÓN PASADA 41



	Centroide X	Centroide Y
Ortoimagen	746404,05	9694111,45
Vuelo 41	746412,17	9694126,91
Diferencias	8,12	15,46

También se realizó un proceso de corrección planimétrica fina en base a la función de mínimos cuadrados. Los vectores se obtienen de la resta de los errores medios cuadráticos obtenidos de todos los puntos extraídos de los polígonos comunes de cada pasada con respecto a los valores que se consideran verdad terreno (Tablas VIII a X).

TABLA VIII  
DATOS PASADA N° 38

Vuelo	Parámetro	X(m)	Y(m)
38	Media	746410,45	9694126,05
	Mediana	746409,36	9694126,82
	S	8,63	9,75
	EMC	8,63	9,75

TABLA IX  
DATOS PASADA N° 41

Vuelo	Parámetro	X(m)	Y(m)
41	Media	746412,87	9694126,66
	Mediana	746411,97	9694127,48
	S	8,73	9,29
	EMC	8,72	9,29

TABLA X  
DATOS CONJUNTOS CORREGIDOS

Vuelo	Parámetro	X(m)	Y(m)
Corregidos	Media	746412,17	9694126,91
	Mediana	746411,86	9694127,87
	S	8,73	9,3
	EMC	8,72	9,29

Con la información corregida, se recortaron los datos con el contorno de la micro-cuenca correspondiente a la división pfafetter a nivel 6 con el área basal de la cuenca hidrográfica.

A continuación, se calcularon las estadísticas generales del archivo resultante del proceso de recorte, obteniendo las características básicas de los datos LiDAR en la micro-cuenca. A partir de este proceso se obtuvo que los datos LiDAR tienen una densidad media por m<sup>2</sup> de aproximadamente 2 puntos/m<sup>2</sup> y un total de 14.901.490 de puntos en la cuenca de estudio. (Figura 11). El 23,13% de la superficie del área de estudio tiene una densidad menor de 2 puntos/m<sup>2</sup> mientras que 70,49% de la superficie presenta una densidad entre 2 y 8 puntos/m<sup>2</sup> y únicamente el 6,38% registra una densidad superior a 8 puntos/m<sup>2</sup> (Figura 12). Este resultado indica que la nube de puntos LiDAR presenta alta densidad.

File Summary

Filename	Minimum X	Minimum Y	Minimum Elevation	Maximum X	Maximum Y	Maximum Elevation	Total Returns	Normalized Density
C:\TEM\GALAS\cuckoo.las	742349,20	9692874,79	2211,27	747946,60	9694937,75	3121,54	14,901,490	1,99

Classification Summary (valid for LAS format files only)

Class value	#Returns	Description	Interpretation
0	0	Class never classified	
1	14,901,490	Unclassified	

Figura 11.- Resultado Catalog archivo recortado

Return Density

Return Density			
Density computed using a cell that is 1.00m by 1.00m units (1.00 square meter)			
Density range is 2884 rows by 3188 columns. Catalog_name: density_38			
Minimum return density (returns per square meter)	1.00		
Maximum return density (returns per square meter)	100.00		
Average return density (returns per square meter)	1.76		
Standard deviation of return density (returns per square meter)	3.94		
Factor	Overlapping		
Cells with no points (could be outside coverage area)	74	Percentage of Area with Data	Percentage of Total
Density less than minimum specification (less than 2.00 points per square meter)	25.53	34.14	43.14
Density more than maximum specification (2.00 to 3.00 points per square meter)	70.49	70.49	70.49
Density exceeds specification (more than 3.00 points per square meter)	6.38	6.38	2.37

Figura 12.- Resultado Catalog/Density archivo recortado

MODELO DIGITAL DEL TERRENO

El archivo resultante es sometido a un filtrado (filterdata) para eliminar posibles outliers, estableciendo como FilterParms el valor 3. De tal forma que cualquier valor fuera del rango establecido por la media ± 3 desviaciones estándar es eliminado. Luego se aplica el filtro groundfilter para la selección

de los datos que son considerados terreno. Paso seguido se transforman estos datos discretos en una superficie continua utilizando el comando GridSurfaceCreate, y se obtiene el MDT en formato ráster (Figura 13).

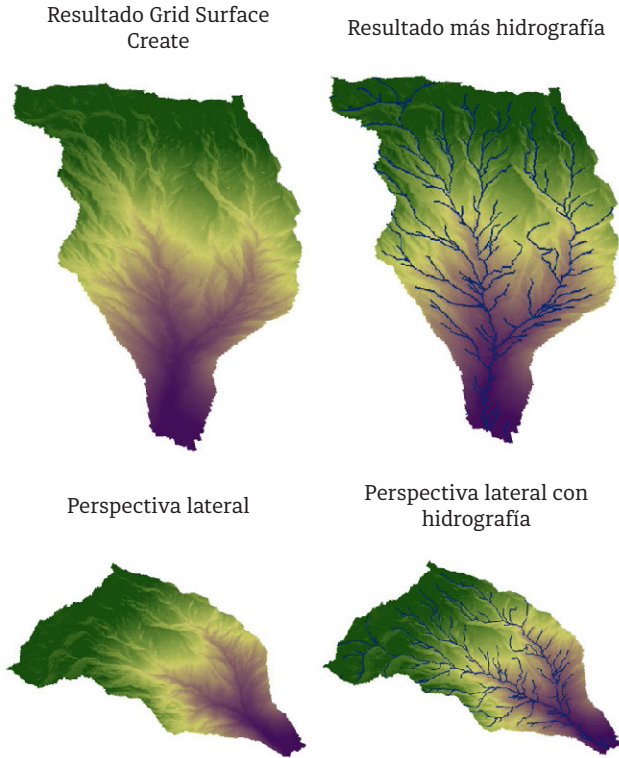


Figura 13.- Modelo Digital del Terreno micro-cuenca de Cutilcay

Para la validación del modelo se realizó un análisis básico en R estadístico para comprobar si la distribución de residuales tiene una distribución normal. Para ello se usa el test de Shapiro-Wilk (Shapiro et al., 1968), conjuntamente con un análisis gráfico usando un diagrama de cuantiles (Figura 14). De los resultados obtenidos se asume que los datos siguen una distribución normal.

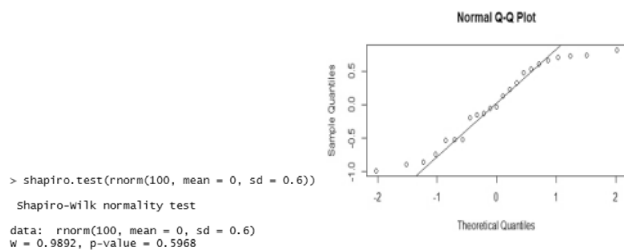


Figura 14.- Análisis R estadístico “distribución residuales”

En la Tabla XI se incluyen los datos recopilados para la validación del MDT. El campo “P\_Z Original” representa los valores originales de los datos LiDAR obtenidos directamente del archivo .LAS; “P\_Z\_MDT” representa los datos recolectados del MDT; y el campo “Diferencia” es el resultado de restar los campos anteriores. El campo más relevante en este caso es el del error medio cuadrático (EMC). El valor máximo es de 0,30 m, que está dentro de los márgenes aceptables de precisión. Calculando el error medio cuadrático global se obtuvo un valor de 0,22 m, donde se deduce que los filtros y el algoritmo de generación del MDT fueron efectivos.

TABLA XI  
Resultados EMC Modelo Digital del Terreno

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
4917	2897,27	4917,00	2897,79	0,52	0,30
4949	2897,29	4949,00	2898,15	0,85	
4981	2897,25	4981,00	2897,40	0,15	
4996	2897,46	4996,00	2897,48	0,03	
5017	2897,28	5017,00	2897,48	0,20	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
1000	3026,04	1000,00	3025,51	0,53	0,18
1001	3026,03	1001,00	3026,56	0,53	
1002	3026,03	1002,00	3025,30	0,73	
1003	3026,04	1003,00	3027,04	1,00	
1004	3026,05	1004,00	3025,22	0,83	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
8963	2660,30	8963,00	2679,81	0,49	0,28
8967	2660,41	8967,00	2661,15	0,75	
8970	2659,90	8970,00	2659,18	0,72	
8974	2660,44	8974,00	2660,57	0,13	
8976	2660,45	8976,00	2660,11	0,34	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
67	2238,73	67,00	2238,11	0,62	0,25
68	2237,00	68,00	2236,25	0,74	
73	2238,80	73,00	2238,85	0,05	
74	2237,23	74,00	2236,99	0,24	
82	2237,05	82,00	2237,58	0,53	

FID	P_Z Original	FID	P_Z MDT	Diferencia	EMC
7	2265,02	7,00	2264,89	0,13	0,06
8	2264,89	8,00	2265,78	0,89	
12	2264,59	12,00	2263,91	0,68	

La distribución de errores parece seguir patrones espaciales debido a la mayor o menor habilidad de los algoritmos para producir los modelos digitales.

#### RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN RÉGIMEN HÍDRICO

##### Parámetros generales.

TABLA XII  
Parámetros morfométricos generales micro-cuenca de Cutilcay

Parámetros Morfométricos generales micro-cuenca del <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Área	km <sup>2</sup>	4,86
Perímetro de cuenca	km	9,89
Largo de cuenca	km	3,37
Ancho de cuenca	km	1,97
Cotas		
Cota máxima	msnm	3166
Cota mínima	msnm	2272,33
Desnivel altitudinal	m	893,67
Centroide (PSC: WGS 1984, UTM, Zona 17S)		
X centroide	m	745904,54
Y centroide	m	9693847,54
Z centroide	msnm	2653,03
Altitud		
Altitud media	msnm	2653,03
Altitud más frecuente	msnm	3063,11
Altitud de frecuencia media	msnm	2820,93

El régimen hídrico resultante de la micro-cuenca, en cuanto al tamaño (área/perímetro) corresponde a una micro-cuenca pequeña. En función a su longitud axial de 3,37 km y al ancho de la micro-cuenca de 1,97km, se deduce se trata de una cuen-

ca semi-alargada. Las cotas registradas para la cuenca son: cota mínima 2272,33 msnm y cota máxima 3166 msnm, obteniendo un desnivel altitudinal de 893,67 m, presentando una altura media de 2653,03 msnm establecida a partir del MDT. El resumen de estos resultados se presenta en la Tabla XII.

*Parámetros de forma*

Desde el punto de vista hídrico, la forma de una cuenca influye en la escorrentía superficial de un cauce, especialmente cuando presenta precipitaciones elevadas. El factor forma en este caso es de 0,23 lo cual indica y reafirma de que se trata de una cuenca alargada (Tabla XIII). Este factor está relacionado al coeficiente de Gravelius, cuyo valor es de 1,27, que indica una cuenca de forma redonda -- ovalo redonda.

**TABLA XIII**

Resultados parámetros de forma micro-cuenca Cutilcay

Parámetros Morfométricos de forma micro-cuenca <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Forma	factor	0,23
Coficiente de <u>Gravelius</u>	km	1,27

*Parámetros de relieve*

Los valores de forma, asociados a parámetros de relieve (Tabla XIV) presentan una pendiente promedio de 50,12%, de lo que se deduce que se trata de una micro-cuenca con potencial de crecidas rápidas e intempestivas. Esto conjuntamente con una pendiente media del cauce principal de 19,42% y un relieve montañoso, no permiten una evacuación rápida del caudal del agua, existiendo riesgo de inundaciones ante precipitaciones fuertes.

**TABLA XIV**

Resultados parámetros relieve

Parámetros Morfométricos de relieve micro-cuenca <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Pendiente promedio de la cuenca	%	50,12
Pendiente media del cauce	%	19,41

El análisis de la curva hipsométrica (Figura 15) es una forma de evaluar el ciclo erosivo y la etapa evolutiva en que se encuentra la cuenca. La gráfica resultante de la curva indica que se trata de una micro-cuenca joven en transición a madura (entre una etapa de equilibrio y una cuenca erosionada de valle), sujeta a procesos erosivos constantes, característico de zonas geológicamente antiguas localizadas principalmente en lugares próximos a las desembocaduras de los ríos.

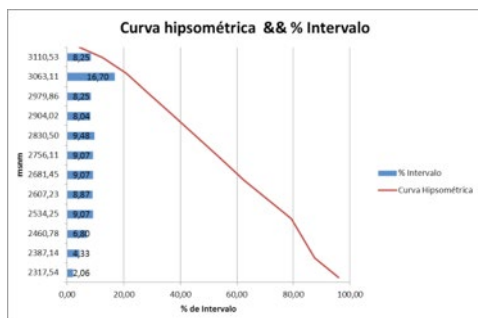


Figura 15.- Curva hipsométrica

*Caracterización red hídrica*

Los tiempos de concentración muy bajos en torno a 0,01 minutos, refuerzan las hipótesis anteriores e indican que la cuenca

está sujeta a fuertes procesos erosivos en los primeros tramos hídricos, pero con tendencia a la estabilización en las partes bajas (Tabla XV). Esto se puede apreciar gráficamente con la modelización del perfil longitudinal de la cuenca, la curva hipsométrica y la relación por densidad de bifurcación, que según (Strahler, 1957), los valores típicos de relación de bifurcación están entre 3 y 5 para cuencas con variaciones considerables en sus características geo-ecológicas. Índices bajos suelen relacionarse con redes fuertemente ramificadas, que repercuten directamente ante fuertes precipitaciones en ondas de crecidas rápidas.

**TABLA XV**

Resultados de orden hídrico según Strahler

Parámetros Morfométricos de la red hídrica micro-cuenca <u>Cutilcay</u>		
Descripción	Unidades	Valor
Longitud Cauce principal	km	4,60
Densidad del drenaje	factor	5,49
Tiempo de concentración	minutos	0,01

La red hídrica tiene un orden de 4 en la escala de niveles de Strahler/ Horton (Tablas XV, XVI), que corresponde a la mayoría de las cuencas alto andinas, deduciéndose que geomorfológicamente se trata de una cuenca relativamente joven en transición a madura, y dinámica en cuanto a sus procesos hidrológicos.

**TABLA XVI**

Resultado índice de bifurcación

Parámetros Morfométricos cuenca <u>Cutilcay</u>		
Orden	#	Índice Bifurcación
1	99	2,15
2	46	1,53
3	30	1,36
4	22	22

Una densidad de drenaje de 5,49 muestra que es una cuenca bien drenada, hecho directamente relacionado con la alta ramificación de la red de drenaje (Tabla XV). También está asociada con los materiales componentes de la micro-cuenca, materiales erosionables, suelos impermeables con pendientes fuertes y escasa cobertura vegetal.

Finalmente, a medida que los parámetros asociados al sistema de drenaje de la micro-cuenca son de mayor magnitud, es de esperar que el tiempo de concentración (Tabla XV) tienda a ser menor con la consiguiente mayor capacidad de producción de caudal superficial.

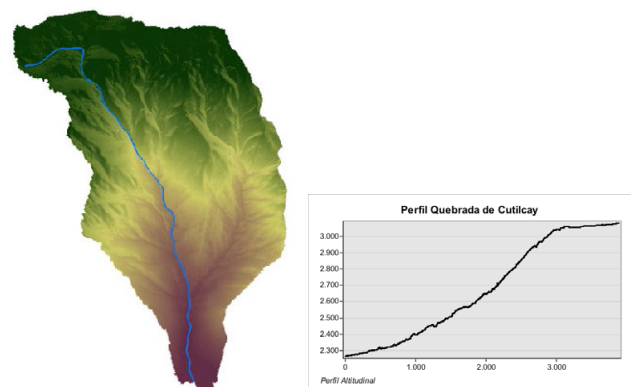


Figura 16.- Perfil y vista frontal del cauce principal

En la Figura 16, el perfil refleja gráficamente la capacidad erosiva del río en sus partes principales (superior y media), mientras que la estructura de red y orden obtenido (Figura 17), muestran una red de tipo dendrítica, con muchas ramificaciones.

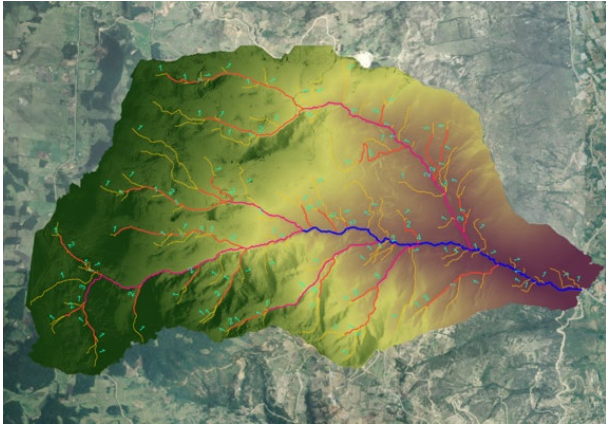


Figura 17.- Gráfica orden hídrico de la cuenca.

#### IV. CONCLUSIONES

La información básica del relieve de una cuenca, sub-cuenca o micro-cuenca hidrográfica, obtenida mediante metodologías analítico-descriptivas permite a quienes trabajan en proyectos relacionados con el uso de los recursos naturales el manejo integrado de cuencas; estudios sobre impacto ambiental; degradación de suelos; deforestación; conservación de los recursos hídricos etc., y contar con los insumos necesarios para el análisis y generación de los parámetros necesarios para determinar el comportamiento dentro de estas unidades hidrográficas. Estos procesos tienen un fuerte componente espacial y el empleo de los SIG es de mucha utilidad, siendo los MDT y sus derivados componentes principales para el análisis.

Destaca la importancia de contar con una descripción cuantitativa precisa de las geo-formas para realizar los análisis que permiten expresar en forma numérica las propiedades geométricas de la micro-cuenca y además de elementos que sirven de base para comprender su evolución y dinámica basal, además de evaluar su funcionamiento y tendencias en cuanto de su régimen hidrológico. En este aspecto, la tecnología LiDAR permite obtener más y mejores detalles para la representación a gran escala de la información geográfica. Sin embargo, se trata de un proceso más laborioso desde el punto de vista de procesado en gabinete y demanda recursos computacio-

nales que justifican la obtención de resultados cualitativos y cuantitativos con mayor precisión y mayor nivel de detalle.

A partir de este trabajo surge por primera vez en el área un análisis morfológico de micro-cuencas que servirá para futuros estudios hidrológicos y para planes de manejo del agua usando datos LiDAR. Los resultados se asumen más precisos que los existentes hasta el momento, aunque se requieren estudios con mayor detalle junto con una validación de campo exhaustiva. Adicionalmente, los resultados demostraron que la escorrentía sigue el comportamiento de la topografía, mientras que el análisis morfométrico advierte que es una zona compleja, con dificultades de evacuar volúmenes importantes de agua debido a su topografía. También presenta una gradiente general pronunciada, que asociada a los parámetros obtenidos, denotan un alto grado de erodabilidad.

Los parámetros generados proporcionaron información sobre la dinámica espacio temporal del caudal hídrico en la cuenca. Así, la densidad de la red de drenaje manifiesta la capacidad de entalle de los cauces fluviales y el equilibrio dinámico del sistema acorde a sus condicionantes hidrológicas, geomorfológicas y topográficas.

Las propiedades morfométricas generadas, apoyadas con datos LiDAR, aportan un marco referencial a efectos de definir la escala espacial de las investigaciones en ecología fluvial. Definiendo la cuenca hidrográfica como unidad de investigación y las propiedades morfométricas de los sistemas fluviales, como marco de referencia para un proceso de ordenación territorial, en donde la política nacional para el ordenamiento territorial, ya menciona como lineamiento principal el enfoque eco-sistémico de cuencas en el Ecuador.

El análisis geoespacial logrado con SIG, como herramienta de apoyo, constituyó un aporte esencial para ilustrar las variables que actúan a una misma escala espacial y altitudinal sobre la extensión de la red de drenaje y dinámica hídrica. Por último, la integración de los parámetros morfométricos en cuencas hidrográficas se considera un aporte significativo y relevante para la consolidación y desarrollo de planes de ordenación territorial.

Se presentará la discusión de los resultados expuestos, relacionándolos con el estado actual u otros estudios, mostrando las ventajas e inconvenientes de cada uno.

Es indispensable que en este apartado se haga referencia a los objetivos concretos y/o aportaciones, así como a su eventual aplicación. La interpretación de los resultados debe estar argumentada y mencionada con sustentos teóricos sólidos.

## REFERENCIAS

- Bakula, K., Dominika, W. y Ostrowski, W. 2014. Verification and improving planimetric accuracy of airborne laser scanning data with using photogrammetric data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XL-3/W1: 21 - 26.
- Baltsavias, E.P. 1999. A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54 (2): 83 - 94.
- Beven, K.J. y Kirkby, M.J. 1979. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 24 (1): 43 - 69.
- Chow, V.T., Maidment, D.R. y Mays, L.W. 1994. *Hidrología aplicada*. Santafé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill.
- Felicísimo, A.M. 1994. *Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Oviedo: Pentalfa.
- García Ruiz, J.M., Gómez Villar, A. y Ortigosa Izquierdo, L.M. 1987. Aspectos dinámicos de un cauce fluvial en el contexto de su cuenca: el ejemplo del río Oja. *Monografías del Instituto Pirenaico de Ecología*. Zaragoza: Consejo Superior de Investigaciones Científicas - CSIC Press.
- Gaspari, F.J., Senisterra, G.E., Delgado, M.I., Rodríguez Vagaría, A.M. y Besteiro, S.I. 2009. *Manual de manejo integral de cuencas hidrográficas*. Gaspari. La Plata: 321.
- Höhle, J. y Höhle, M. 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 64 (4): 398 - 406.
- Höhle, J. y Øster Pedersen, C. 2010. A new method for checking the planimetric accuracy of Digital Elevation Models data derived by Airborne Laser Scanning. En N.J. Tate y P.F. Fisher, eds., *Accuracy 2010. Proceedings of the Ninth International Symposium on Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences*. Leicester, Uk: University of Leicester, 253 - 256.
- Höhle, J. y Potuckova, M. 2011. *Assessment of the quality of digital terrain models*. Official Publication. Amsterdam, The Netherlands: European Spatial Data Research.
- Horton, R.E. 1932. Drainage-basin characteristics. *Transactions, American Geophysical Union*, 13: 350 - 361.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, 56 (3): 275 - 370.
- Jardí, M. 1985. Forma de una cuenca de drenaje. Analisis de las variables morfométricas que nos la definen. *Revista de Geografía*, 19: 41 - 68.
- Jones, A.F., Brewer, P.A., Johnstone, E. y Macklin, M.G. 2007. High-resolution interpretative geomorphological mapping of river valley environments using airborne LiDAR data. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32 (10): 1574 - 1592.
- Kirpich, Z.P. 1940. Time of concentration for small agricultural watersheds. *Civil Engineering*, 10 (6): 362.
- Kraus, K. y Pfeifer, N. 1998. Determination of terrain models in wooded areas with Airborne Laser Scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 53 (4): 193 - 203.
- Kraus, K. y Pfeifer, N. 2001. Advanced DTM generation from LiDAR data. *International Archives Of Photogrammetry Remote Sensing And Spatial Information Sciences*, 34 (3/W4): 23 - 30.
- Liu, X., Zhang, Z., Peterson, J. y Chandra, S. 2007. LiDAR-derived high quality ground control information and DEM for image orthorectification. *Geoinformatica*, 11 (1): 37 - 53.
- De Llano, F. y Mintegui Aguirre, J.A. 1986. *Hidrología de la superficie-TI*.
- Meng, X., Currit, N. y Zhao, K. 2010. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data: A review of critical issues. *Remote Sensing*, 2 (3): 833 - 860.
- Metternicht, G., Humi, L. y Gogu, R. 2005. Remote sensing of landslides: An analysis of the potential contribution to geo-spatial systems for hazard assessment in mountainous environments. *Remote Sensing of Environment*, 98 (2): 284-303.
- Montgomery, D.R., Dietrich, W.E. y Sullivan, K. 1998. The role of GIS in watershed analysis. En S.N. Lane, K.S. Richards y J.H. Chandler, eds., *Landform Monitoring, Modelling and Analysis*. 1st (eds.). Wiley, 466.
- Moreno Brotóns, J., Alonso Sarría, F., Gomariz Castillo, F. y Alonso Bernardo, D. 2010. Análisis y validación de modelos digitales de elevaciones mediante datos LiDAR. En J. Ojeda, M.F. Pita y I. Vallejo, eds., *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Sevilla: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla, 254 - 271.
- Nelson, A., Reuter, H.I. y Gessler, P. 2009. DEM production methods and sources. *Developments in Soil Science*, 33: 65 - 85.
- Patton, P.C. y Baker, V.R. 1976. Morphometry and floods in small drainage basins subject to diverse hydrogeomorphic controls. *Water Resources Research*, 12 (5): 941 - 952.
- Schneider, A.E. 1991. *Theoretical Geomorphology*. Berlín: Springer.
- Shapiro, S.S., Wilk, M.B. y Chen, H.J. 1968. A comparative study of various tests for normality. *Journal of the American Statistical Association*, 63 (324): 1343 - 1372.
- Splinter, D.K., Dauwalter, D.C., Marston, R.A. y Fisher, W.L. 2011. Watershed morphology of highland and mountain ecoregions in eastern Oklahoma. *Professional Geographer*, 63 (1): 131 - 143.
- Strager, M.P., Fletcher, J.J., Strager, J.M., Yuill, C.B., Eli, R.N., Todd Petty, J. y Lamont, S.J. 2010. Watershed analysis with GIS: The watershed characterization and modeling system software application. *Computers & Geosciences*, 36 (7): 970 - 976.
- Strahler, A.N. 1952. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin*, 63 (11): 1117 - 1142.
- Strahler, A.N. 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Civil Engineering*, 101: 1258 - 1262.
- Suárez, J., Ontiveros, C., Smith, S. y Snape, S. 2005. Use of airborne LiDAR and aerial photography in the estimation of individual tree heights in forestry. *Computers & Geosciences*, 31 (2): 253-262.

- Tarolli, P. y Dalla Fontana, G. 2007. Analysis of the headwater basins' morphology by high resolution LiDAR-derived DTM. Proceedings of the 5th International Symposium on Mobile Mapping Technology. Padova, Italy, 2007: .
- Wani, S.P. y Garg, K.K. 2009. Watershed management concept and principles. Best-bet Options for Integrated Watershed Management. ICRISAT Patancheru, Andhra Pradesh, India, 2009: 1 - 11.
- Wu, J., Ma, H. y Li, Q. 2008. Least squares matching with airborne LiDAR data for strip adjustment. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37 (Part B3b): 167 - 172.
- on and Adjustment of Shifts in Daily Precipitation Data Series. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2416-2436. <https://doi.org/10.1175/2010JAMC2376.1>
- Zhang, X., & Srinivasan, R. (2009). GIS-Based Spatial Precipitation Estimation: A comparison of Geostatistical approaches, 45(4), 894-906.

# Sistemas de seguridad ciudadana por georeferenciación y geolocalización para zonas rurales del cantón Cuenca incorporados al SIS ECU 9-1-1 del Ecuador

Icaza Álvarez Daniel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Unidad Académica de Ingeniería de Industria y Construcción, Universidad Católica de Cuenca, Cuenca Ecuador  
Dirección de Carrera de Ingeniería Eléctrica  
Área de Redes y Telecomunicaciones

\*Autor corresponsal: Av. Las Américas y General Torres Esq. Dirección de Carrera.  
dicazaa@ucacue.edu.ec

## RESUMEN

En el presente artículo se diseña un sistema de Seguridad apoyados en los modernos sistemas de georeferenciación y geolocalización que dispone el Centro Integrado ECU 9-1-1. El sistema se amplía a las zonas rurales del cantón Cuenca diseñado en función de la experiencia exitosa en la ciudad de Cuenca, además se considera el sistema del botón de auxilio para las camionetas que están legalmente facultadas para prestar los servicios en las zonas rurales. Al sistema GIS se lo incorporan cámaras de monitoreo en las principales arterias viales y espacios públicos para continuamente realizar el monitoreo desde el Centro integrado ECU 9-1-1, al igual que receptor llamadas de auxilio y accionamiento de botones de pánico desde sitios estratégicos. En el Centro de monitoreo se tendrán alarmas de emergencia con la georeferenciación de donde provienen los llamados de auxilio rurales para luego de un rápido análisis interno y apoyados en los sistemas de telecomunicaciones se puedan despachar los recursos policiales, bomberos, cruz roja, entre otros.

Palabras clave: **Redes de Telecomunicaciones, Georeferenciación, ECU-911, Zonas Rurales, Seguridad.**

## ABSTRACT

*In this article, a Security system is designed based on the modern georeferencing and geolocation systems provided by the Integrated Center ECU 9-1-1. The system is extended to the rural areas of the canton Cuenca designed based on the successful experience in the city of Cuenca, in addition is considered the aid button system for trucks that are legally empowered to provide services in rural areas. The GIS system incorporates monitoring cameras in major road arteries and public spaces to continuously monitor from the integrated ECU 9-1-1 Center, as well as receiving distress calls and triggering panic buttons from strategic locations. In the Monitoring Center will have emergency alarms with the georeferencing of where the rural calls for help come after a rapid internal analysis and supported in the telecommunications systems can dispatch the police resources, firemen, red cross, among others.*

Keywords: **Telecommunications Networks, Georeferencing, ECU-911, Rural Areas, Security.**

## I. INTRODUCCIÓN.

Desde la creación del Sistema Integrado Ecu 911, se ha visto los logros alcanzados en cada uno de los centros de atención, hasta la presente fecha ha cumplido 5 años el Ecu 911. Gracias a este sistema se ha podido tener información de varios de los sectores del país, ayudando a combatir la inseguridad, accidentes de tránsito, entre otros.

Si bien estos avances han sido enormes en nuestro país no es menos cierto que las zonas rurales no se han visto directamente favorecidas probablemente por los altos costos de lo que implica implementar estos sistemas pero que sin duda deben ser cubiertos en corto o mediano plazo para lo cual en este artículo lo hemos considerado y aprovechamos los recursos tecnológicos que ventajosamente existen y que pueden ser de gran valía para llevarlo a la práctica.



Fig. 1. Sistema de geolocalización en el ECU-911

## VIDEOVIGILANCIA PARA ZONAS RURALES.

El servicio de videovigilancia de las zonas rurales deberá estar enlazado al ECU 911 utilizando lo más avanzado de la tecnología para monitorear las actividades que puedan generar situaciones de riesgo. En el sistema GIS de la consola para monitoreo se debe identificar el sitio exacto de donde proviene la alerta.

Al sistema de videovigilancia actual se lo deberá incorporar las cámaras que se instalen en las zonas rurales de acuerdo a un análisis de las zonas más vulnerables, índices de peligrosidad, espacios públicos de alta concurrencia y en sí realizar distintos circuitos cerrados de videovigilancia.

## VINCULACIÓN COMUNITARIA

Charlas y capacitaciones a niños, jóvenes y comunidades enfocadas en el buen uso del servicio ECU 911 y la importancia de la colaboración de los Gad's Parroquiales, Tenencias Políticas, ONG's, Pastoral social y en sí de la ciudadanía en la seguridad integral.

## COORDINACIÓN INSTITUCIONAL

EL trabajo en conjunto de todas las instituciones de respuesta a emergencias permite que una misma situación sea atendida desde una perspectiva completa permitiendo una respuesta eficaz e integral. Reduce los tiempos de respuesta y logra movilizar unidades especializadas para urgencias puntuales. (Pozo P. y Cherez J., 2012)

Gracias al sistema GIS es posible identificar rutas más cercanas, centros policiales, bomberos y otros los cercanos y así dar una pronta respuesta a situaciones de emergencia. (Municipalidad de Cuenca, 2014)

El Servicio Integrado de Seguridad ECU 911 para las provincias de Azuay y Cañar fue inaugurado el 30 de abril de 2012 por el Presidente de la República Ec. Rafael Correa Delgado.

El área de cobertura de este centro zonal articula la labor en torno a temas de seguridad y atención de emergencias con autoridades y ciudadanía en ámbitos provinciales, cantonales y también se debe incorporar a los parroquiales de manera directa ampliando la infraestructura.

## II. MÉTODO.

El sistema SIS- ECU 911 está diseñado en tres niveles: nacional, regional y provincial (Municipalidad de Cuenca, 2014). Nuestro diseño del Sistema es para las zonas Rurales del Cantón Cuenca lo cual puede ser considerado como un plan piloto a nivel Nacional. Ver figura 2. (CEIEC, 2012)

En la provincia del Azuay tenemos un centro de Control para desde allí recibir las emergencias y despachar los distintos recursos.

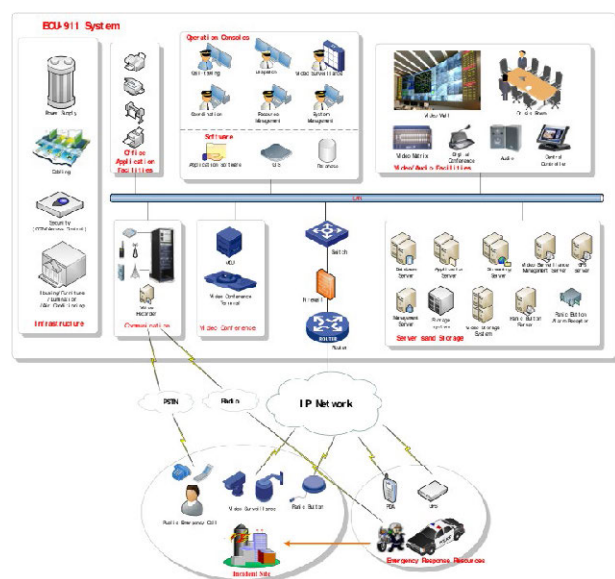


Fig. 2.- Subsistema de soporte de hardware y software que incluye soporte a zonas Rurales del Cantón Cuenca.

Para recibir y despachar alarmas, administrar recursos para el respectivo análisis preventivo y alerta temprana, para la gestión de datos. Dentro de los subsistemas citamos los más generales. (CEIEC, 2012)

- Subsistema de recepción de alarmas
- Subsistema de administración de recursos
- Subsistema de administración de incidentes
- Subsistema de pronóstico y alerta temprana
- Subsistema de análisis y evaluaciones
- Subsistema de informaciones geográficas
- Subsistema de base de datos
- Software de soporte básico

## RELACIONES INTERSERVICIOS DEL SISTEMA

- El centro del sistema consiste en recibir y despachar las alarmas de manera integral.
- Las funciones de pronóstico y alerta temprana, análisis y evaluación, comando y despacho, gestión de recursos, consultas colectivas y decisión en sitio ofrecen apoyos técnicos y medios eficientes.
- El servicio de administración y garantía general asegura el funcionamiento fluido del sistema.
- GIS ofrece espacios para la aplicación y exposición del sistema



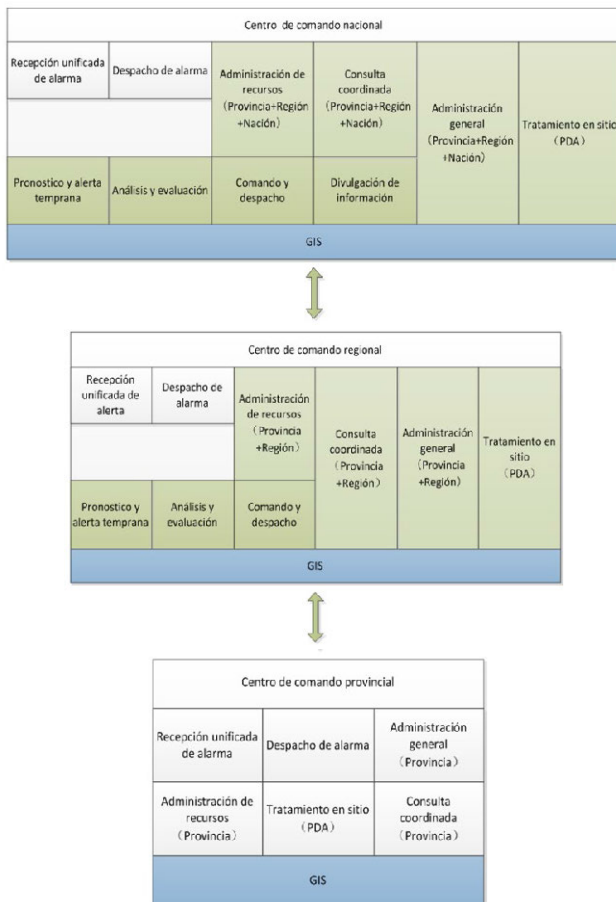


Fig.3.- Cuadro de Relaciones interservicios de Sistema soportados en el GIS (CEIEC, 2012)

PROCESO GENERAL DEL SISTEMA

- El sistema, en lugar de ser aislado, es un conjunto integral.
- El sistema GIS ofrece espacios de datos y servicio.
- El sistema de administración de recursos efectúa mantenimiento y administración de informaciones básicas y ofrece datos de base a otros servicios.
- El sistema PDA coopera con el sistema de despacho de alarmas, asegurando la comunicación entre el sitio de incidente y el centro de comando en tiempo real.
- Consultas colectivas es un medio eficaz para tratar eventos imprevistos, cuyo resultado será útil para orientar el trabajo.
- Recepción de alarma, tratamiento de alarma, administración de alarma, pronóstico y alerta de alarma, Análisis del procesamiento de alarma. (CEIEC, 2012)

SUBSISTEMA DE SOPORTE DE HARDWARE

- Subsistema de hardware abarca dispositivos de visualización, conmutadores de comunicaciones, servidores, terminal de operación, impresora, copiadora etc.
- Este sistema se dedica a soportar el funcionamiento del sistema de software y realizar varias funciones. Ver figura 4.
- Subsistemas Principales:
  - Subsistema de visualización
  - Subsistema de video vigilancial
  - Subsistema de botón de pánico
  - Subsistema de GPS
  - Subsistema de control de comunicación
  - Subsistema de almacenamiento
  - Subsistema de videoconferencia
  - Subsistema de conferencia digital
  - Subsistema de seguridad de construcción
  - Subsistema de cableado general
  - Subsistema de distribución de energía

SUBSISTEMA DE HARDWARE

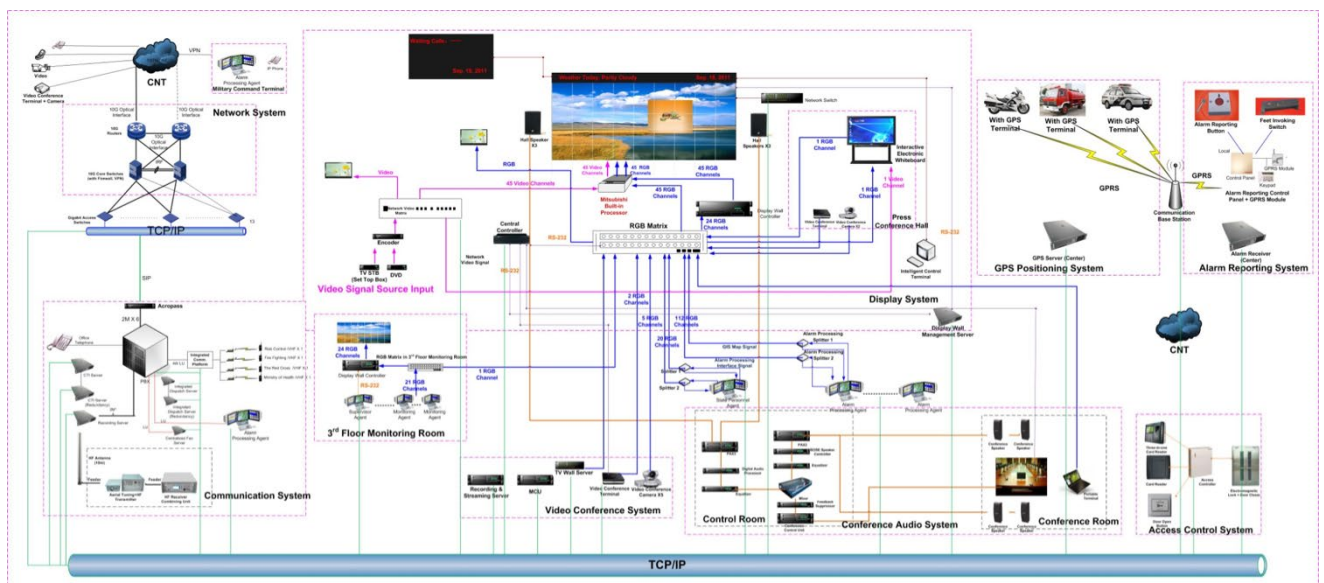


Fig. 4.- Esquema de Subsistema de Hardware (CEIEC, 2012)

**SISTEMA DE VISUALIZACIÓN**

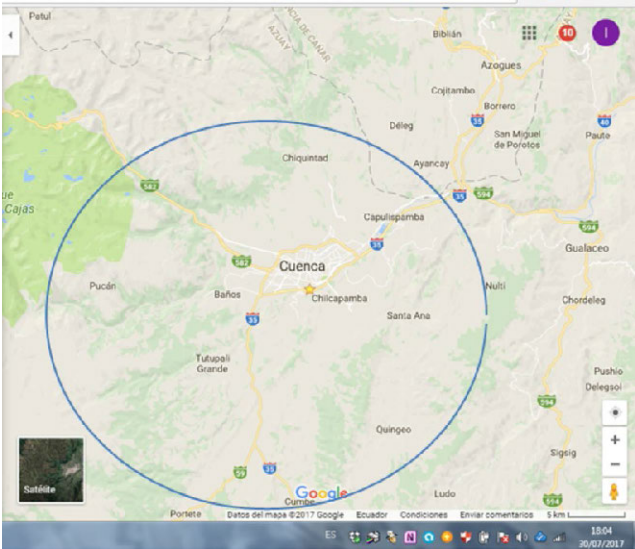


Fig. 5.- Ejemplo del Sistema de Visualización

**ESTRUCTURA DE CCTV**

El subsistema de CCTV forma una parte importante del sistema de seguridad, se deberán instalar cámaras CCTV en áreas vitales de las zonas rurales de las 21 Parroquias Rurales, salidas y entradas para vigilar y controlar, y los videos que transmiten a DVR que está en la sala de guardia del ECU-911 con el fin de guardar y ser revisado.

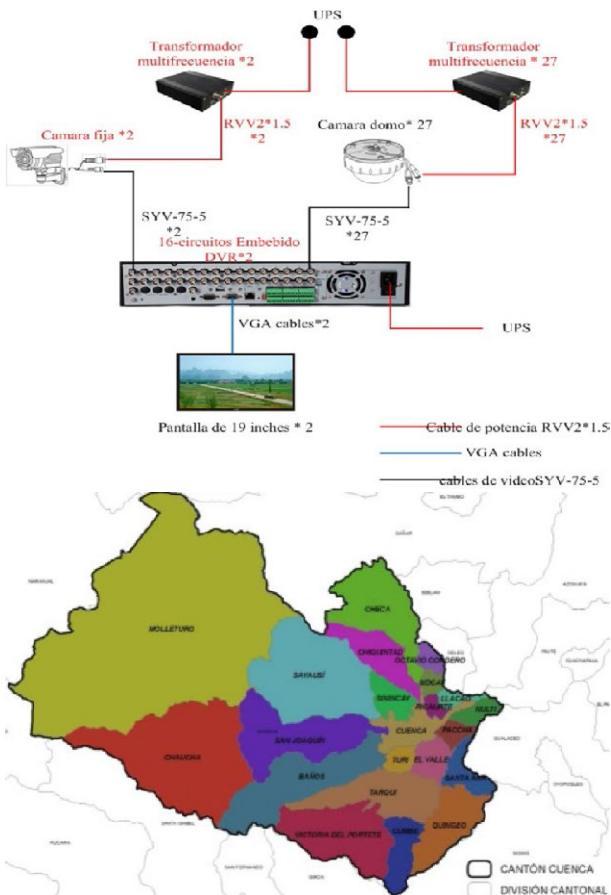


Fig. 6.- Subsistema de Seguridad en las 21 parroquias rurales.

**SUBSISTEMA DE PDA**

En la figura 7 se muestra la arquitectura general del subsistema de PDA. El sistema de terminal de emergencia es un programa de aplicación en PDA, comprende las funciones como la recolección y el almacenamiento de datos, también se realiza el intercambio de datos con el terminal de servicio de PDA. (CEIEC, 2012)

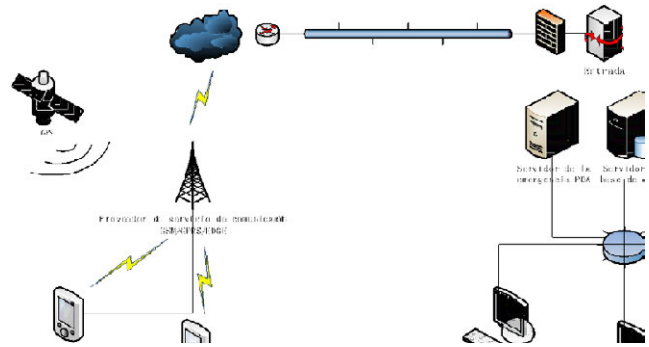


Fig. 7.- Subsistema PDA

**SUBSISTEMA DE GPS**

El subsistema de GPS se usa para ubicar los vehículos legalmente autorizados para transportar personas y mercadería que se encuentran identificados con la línea verde y buses de color verde autorizados, con el fin de mandar, despachar y gestionar los vehículos vigilados. El subsistema de GPS consiste en los terminales vehicular de posicionamiento y el servidor de segundo fondo de GPS en el Centro de comando. (CEIEC, 2012)

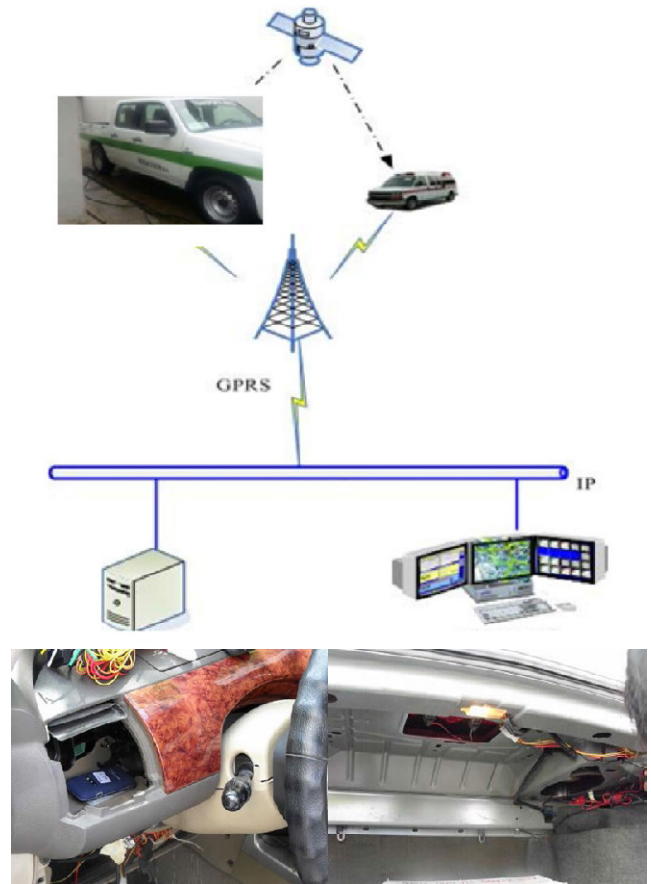


Fig.8.- Subsistema de GPS

TECNOLOGÍA DE APLICACIÓN DE GIS

- El mapa puede mostrar la ubicación de varios eventos, lo que puede ayudar a la policía a descubrir la posible relación entre los eventos.
- El mapa mostraría la distribución de los eventos para ayudar a la policía a manejar la situación general .
- Con la información profesional geográfica se puede saber los detalles del sitio.
- Se visualizaría el despliegue de la policía en el mapa y determina el centro policial más cercano.
- Se puede ayudar a determinar la ruta óptima para enviar los recursos policiales, bomberos, cruz roja, etc.
- Hacer clic en el evento en el mapa para abrir registros al respecto.
- Encontrar la unidad responsable del sitio.

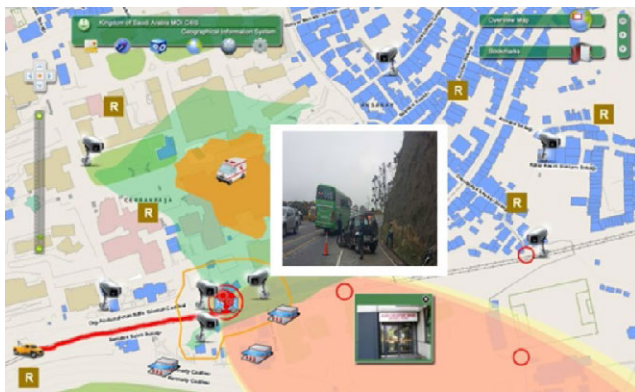


Fig.9.- Aplicación del GIS

RECOMENDACIÓN AUTOMÁTICA EN EL MAPA.

- Se puede recomendar el uso de la policía, bomberos, cruz roja, etc. durante el despacho.
- Se puede desplegar la policía, bomberos, cruz roja, etc. en cierta zona con la tecnología de posicionamiento.

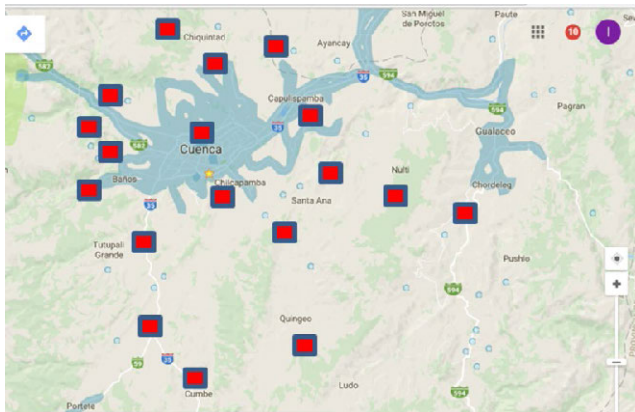


Fig.10.- Recomendaciones en el mapa para despacho de recursos.

SUBSISTEMA DE BOTÓN DE PÁNICO

El subsistema de botón de pánico puede ofrecer conveniencia para los ciudadanos al encontrar situaciones urgentes. Al presionar el botón, la información del incidente puede ser transmitida al Centro mediante la red de comunicación, y el Centro despacharía los recursos. El sistema de botón de pánico con-

tiene en el Receptor IP del Centro y los equipos periféricos de recepción de alarmas. (CEIEC, 2012)



Fig.11.- Esquema Botón de Pánico

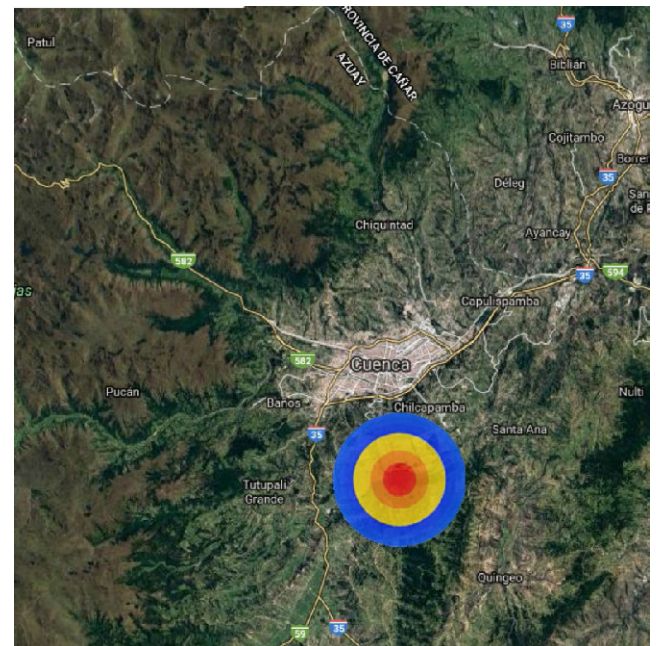


Fig.12.- Ubicación de una alerta en el Mapa por accionamiento del botón de pánico.

POLICÍAS MOVILIZADOS DURANTE EL AÑO 2016

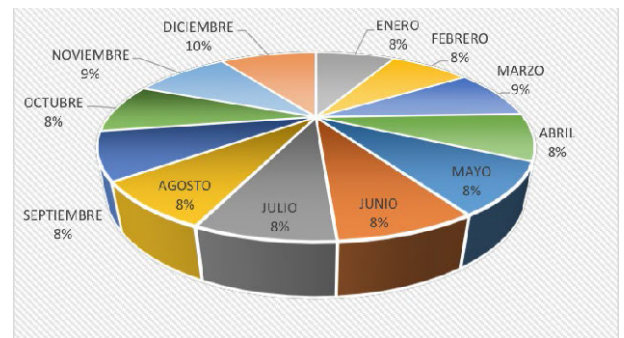


Fig.13.- Distribución porcentual de policías año 2016.

De acuerdo a la gráfica 13, se puede apreciar; que las proporciones en movilización de policías son bastante similares durante los distintos meses del año. Las variaciones no son significativas a lo largo de los meses. (Estadísticas Ecu-911, 2016) .

**III. RESULTADOS.**

El Sistema Integrado de seguridad ECU-911 cumple un papel significativo en respuesta a los incidentes generados en el

país y particularmente en el Azuay arrojan resultados positivos en protección. Sin embargo el despliegue tecnológico a nivel de las zonas rurales no han sido en condiciones igualitarias con el sector urbano obedece sin duda a muchos factores como es el acceso a la telefonía, acceso a la red eléctrica, seguridad de la infraestructura a instalarse, pero gracias a la interconexión de servicios se puede incorporar al sector rural a esta era tecnológica mediante el apoyo de los Sistemas GIS, GPS y otros y obtener seguramente resultados muy alentadores. Implica inversión pública y decisión política de llevar a cabo estos proyectos de gran envergadura.

Los sistemas GIS son de un apoyo bastante importante pero deben ser actualizados en las plataformas de seguridad, donde la información sea veraz para una respuesta oportuna e identificar las coordenadas exactas.

El sistema GIS se integra a todo el sistema de telecomunicaciones y forma parte importante y muy necesaria para que los sistemas funcionen de manera correcta y eficaz.

#### **IV. CONCLUSIONES**

El sistema de telecomunicaciones propuesto para las zonas rurales fácilmente se acopla al ya existente y se integra en conjunto con los sistemas GIS y GPS.

Los mapas actuales carecen de información a detalle en las zonas rurales y deberán ser actualizados completamente ya que al no hacerlo y llevar adelante la construcción de las distintas plataformas tecnológicas los resultados pueden ser errados y por ende los recursos que se destinen pueden resultar en vano o tardía.

La zona rural constituye el cordón de desarrollo y producción primaria, motor de desarrollo del país y debe ser atendida con la misma prolijidad como se lo hace a nivel urbano. Sin duda puede haber inconvenientes de acceso pero siempre se debe planificar con miras atender a esta parte de la población que en muchos de los casos carece de servicios básicos.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a la Universidad Católica de Cuenca por el apoyo brindado para sacar adelante la presente investigación, de igual manera a varios de los funcionarios que ECU 911 que fueron guía para elaborar esta investigación pensando siempre en contribuir a la sociedad y ser parte integral de estos procesos de investigación y mejora académica.

#### **REFERENCIAS**

- CEIEC (2012), Solution & Engineering of defense and security Information Systems . Cursos profesionales. Ecuador.
- Pozo P. y Cherrez J. (2012), Sistemas de georeferenciación, México.
- Municipalidad de Cuenca (2014) , Plan de Ordenamiento territorial del Cantón Cuenca Administración 2009- 2014.
- Estadísticas Ecu-911, (2016) <http://www.ecu911.gob.ec/estadisticas/>

# Valoración de la fragilidad visual del paisaje del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama mediante evaluación indirecta por componentes

Vallina Rodríguez, Alejandro<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geografía /  
Facultad Filosofía y Letras / Univer-  
sidad Autónoma de Madrid  
Calle Fco. Tomás y Valiente nº 1,  
CP 28049- Madrid/ Comunidad de  
Madrid/ España  
alejandro.vallina@predoc.uam.es

## RESUMEN

El paisaje, como espacio geográfico originado tras la conjunción de rasgos tanto naturales como antrópicos, lleva aparejada una inherente relación entre los seres humanos y el medio ambiente sustentada en la percepción cognitiva del espacio a través de la vista, por lo que su estudio deberá contextualizarse dentro de un grado de subjetividad relativo. Bajo este hilo argumental el paisaje visual se ha abordado tradicionalmente desde dos concepciones complementarias, la calidad y la fragilidad visual, ambos condicionados por los componentes naturales del paisaje y los elementos antrópicos exógenos que pueden inducir connotaciones positivas y negativas. La multiplicidad de componentes del paisaje, unido a la confluencia de otros condicionantes como el campo visual, hace que la valoración de su fragilidad, entendida como el perjuicio que sufriría un determinado paisaje ante la ocurrencia de cambios o actuaciones en él, sea una tarea compleja para la que el uso combinado de las metodologías de Evaluación MultiCriterio (EMC) y los SIG se ha erigido en herramienta básica del análisis de la fragilidad visual del paisaje. La investigación que aquí se presenta nace con la intención de valorar cualitativa y sistemáticamente el paisaje del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama a través de un método indirecto de evaluación por componentes mediante la conjunción de la EMC y los SIG. El ejercicio de traducción e interpretación técnica de los diversos factores que configuran este paisaje finalizará con la consecución de una cartografía global del ámbito, que muestre detalladamente los valores de fragilidad visual de forma territorializada.

Palabras clave: Paisaje, SIG, EMC, fragilidad visual, apreciación.

## ABSTRACT

*The landscape, as a geographical space originated after the conjunction of both natural and anthropic traits, has an inherent relation between human beings and the environment based on the cognitive perception of space through sight, so that their study must contextualize within a relative degree of subjectivity. Under this plot line the visual landscape has traditionally been approached from the complementary conceptions, the quality and the visual fragility, both conditioned by the natural components of the landscape and the anthropic elements that can induce positive and negative connotations. The multiplicity of components of the landscape, together with the confluence of other conditions*

*such as the visual field, makes the assessment of its fragility, understood as the damage suffered by a given landscape before the occurrence of changes or actions in it, the sea one Complex task For the combined use of MultiCriteria (EMC) assessment methodologies and GIS, it has been established as the basic tool for the analysis of landscape visual fragility. The research presented here intends to qualitatively and systematically evaluate the landscape of the Sierra de Guadarrama National Park through an indirect method of component evaluation through the conjunction of the EMC and the GIS. The translation and technical interpretation of the various factors that shape this landscape ends with the achievement of a global cartography of the field, which show in detail the values of visual fragility in a territorialized way.*

**Keywords: Landscape, GIS, MCE, Visual Fragility, Appreciation.**

## I. INTRODUCCIÓN

El creciente interés que el paisaje ha adquirido en las últimas décadas se ha plasmado, de forma casi inevitable, en una producción científico-técnica muy extensa, que en la siguiente comunicación pone el acento en los renovadores enfoques interdisciplinarios sobre el paisaje desde una aplicación puramente práctica, integrando en la labor del paisajista el intercambio constante de métodos e ideas (Antrop, 2005), emanao todo ello de las corrientes emergentes en las ciencias que tradicionalmente se ocuparon del paisaje, tales como la ecología y la geografía. De este modo el paisaje ya no es visto y tratado como una combinación de ciencias, si no que se sitúa por encima de éstas para trocar en una forma universal de observar el medio. Es por ello que desde este trabajo el paisaje ha adoptado la concepción de paisaje realizada por (Cancer, 1994), que lo define como un conjunto de hechos visibles o invisibles, de los que el observador percibe, en un momento dado, un resultado global de un territorio. Es en este punto, donde el paisaje pasa a interpretarse desde el punto de vista perceptual, y por ello la presente investigación se inclina hacia una evaluación del grado de identificación de las personas con determinados paisajes y, derivado de ello, hacia una cuantificación de la fragilidad visual y estética de los mismos.

De este modo el paisaje ha ido percolando en el imaginario de las sociedades modernas como un bien territorial con entidad propia se ha de considerar el recurso desde el punto de vista de sus dos criterios inherentes: la capacidad del territorio que ocupa, su información ambiental; y el impacto que en la calidad ambiental tiene el uso del territorio, sus características visuales (Ormaetxea, 1997). En este viraje de la acepción del paisaje que aquí se trae a colación resulta tremendamente interesante el progresivo e imparable empoderamiento de la sociedad en las decisiones respecto a su entorno de vida, tanto privado como público. Indudablemente detrás de este proceso de toma de decisiones abierto se encuentra la relación entre el desarrollo de la sociedad moderna y su preocupación por la calidad ambiental, de forma que "las sociedades que perciben con mayor claridad el recurso paisaje dejan de residir o visitar zonas paisajísticamente degradadas" (Mérida, 1996). Dos son los componentes a los que se recurrirá generalmente en la determinación del valor global de calidad paisajística: la calidad visual y la fragilidad visual. Pudiendo ser ambas evaluadas mediante metodologías directas o indirectas. La presente investigación únicamente considerará una de las patas de la evaluación paisajística, la relacionada con la fragilidad. Asumiendo la tesis de que todo paisaje posee una serie de cualidades intrínsecas y extrínsecas residentes en sus elementos bióticos y abióticos, se puede afirmar que estos deberán ser advertidos por cada uno de los distintos observadores del territorio, esto es, el paisaje visual (y por ende su fragilidad) se valora de forma diferente según cada observador. En este sentido la valoración de la fragilidad visual de un determina-

do ámbito ha adquirido en las últimas décadas un papel trascendental de complementariedad en el estudio de los territorios, al aportar el papel de modulador de la calidad a partir de la predicción del impacto de las modificaciones planteadas sobre el carácter del paisaje analizado. Al igual que ocurre con el concepto de calidad visual, la fragilidad visual está sometida a una enorme diversidad de criterios y definiciones, aunque la bibliografía sobre la materia muestra un elevado consenso científico en torno al concepto de fragilidad visual del paisaje entendida como "la respuesta al cambio de sus propiedades paisajísticas o la susceptibilidad de un paisaje al cambio cuando se desarrolla un uso sobre él" (Cifuentes, 1979).

Ambas definiciones presentadas parecen indicar un sentido convergente en señalar que la fragilidad visual no es sino un método para valorar el perjuicio que sufriría un determinado ambiente (o paisaje) ante la ocurrencia de cambios o actuaciones en su seno.

Debido a la naturaleza y multiplicidad de los datos y los análisis necesarios, el abordaje metodológico se realizó empleando la Evaluación Multicriterio (EMC) con apoyo en Sistemas de Información Geográfica (SIG), en concreto, el software ArcGIS 10.2. La Evaluación Multicriterio (EMC) se ha convertido en las últimas décadas en unos de los procedimientos más utilizados (Galiana y Vallés, 2007). Las técnicas EMC han sido definidas como un conjunto de técnicas orientadas a asistir a los procesos de toma de decisión, investigando un número de alternativas a la luz de los múltiples criterios y objetivos que influyen en la evaluación del valor de la fragilidad paisajística, así como los aspectos ambientales de mayor relevancia espacial y las actividades humanas que afectan de un modo u otro a la visión global (Valpreda, 2007).

Las alternativas adoptadas en el proceso de toma de decisiones se configuran como las más idóneas para el decisor y el objetivo, lo cual no está exento de un grado mayor o menor de subjetividad, la cual entra a formar parte del resultado. Las técnicas EMC, y más concretamente el uso del denominado Modelo analítico Jerárquico (AHP) ha sido de utilidad en este proyecto para descomponer las relaciones complejas de los componentes del paisaje, ordenándolos en una estructura jerárquica donde se obtienen valores numéricos válidos para la valoración de la calidad visual (Santos, 1997).

Por otra parte, la integración del análisis multicriterio en los SIG permite combinar y valorar simultáneamente los criterios (las bases para la toma de decisión) con sus factores (los aspectos que los hacen fuertes o los debilitan) a través del uso de sus atributos (las variables) dentro de unas determinadas reglas de decisión y valoración. La bondad del uso combinado de EMC y SIG para el análisis de distintos fenómenos geográficos, debido a su potencial para emular la toma de decisiones a la vez que para trabajar con volúmenes importantes de

información geo-referenciada, aparece en múltiples trabajos (Santos y Cocero, 2006). Del mismo modo debe considerarse que dentro de las técnicas de Evaluación Multicriterio son diversas las combinaciones de procedimientos que pueden usarse, aunque en el caso concreto de la evaluación de los componentes del paisaje se ha estimado (Malczewski, 2004) la fusión de la llamada combinación lineal ponderada (WLC, Weighted Linear Combination) de las capas del territorio y la AHP (Analytic Hierarchy Process) como el modelo más adecuado y directo para la consecución de un modelo de gestión de la calidad visual (Pérez et al, 2015)

Esta modelización de la realidad paisajística del espacio y la cuantificación de sus características para los fines más variados en la gestión global del medio lleva desarrollándose de forma profunda más de dos décadas, por lo que se han tomado como referencia algunas investigaciones en las que se han realizado estudios de paisaje utilizando la EMC y los SIG, tales como los de (Orán et al., 2010) "Una propuesta complementaria de análisis de sensibilidad de un modelo basado en técnicas SIG y evaluación multicriterio" sobre la modelización del crecimiento urbano y la localización óptima de zonas residenciales, comerciales e industriales en la Comunidad de Madrid. Por último, se tomó como referencia el trabajo "Un Modelo de Aplicación de SIG y Evaluación Multicriterio, al Análisis de las Capacidad del Territorio en Relación a Funciones Turísticas" (Ocaña y Galacho, 2002), donde se desarrollaba un modelo evaluación multicriterio de la capacidad del territorio con relación a diversas funciones turísticas y enfocada a la planificación del territorio.

#### OBJETIVOS

El objetivo fundamental de la investigación que aquí se presenta pasa por la consideración del paisaje desde el punto de vista exclusivamente visual, centrándose en los aspectos derivados de la percepción para concretar una valoración de la fragilidad visual del paisaje de una de las zonas más emblemáticas de la geografía del interior de la meseta Ibérica. Dicha valoración se elaboró a partir de la descomposición del paisaje según sus elementos visuales principales para la generación de un método independiente de los usuarios del paisaje, en el que la valoración de la fragilidad visual del paisaje se realizó de forma directa por expertos, por lo que la subjetividad queda implícita y puede controlarse mediante un criterio uniforme, y la evaluación emana de la contemplación del paisaje. La disgregación del paisaje en componentes persigue la elaboración de una imagen completa de los valores tanto naturales como culturales (Fuente de Val, 2004) contenidos en el paisaje propio del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama (España) y su ámbito de influencia más próximo. Esta selección de componentes o factores visuales del paisaje será la base de la generación del método que aquí se propone.

#### ÁREA DE ESTUDIO

Por otro lado, es necesario comprender que el área de trabajo, El Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama (Comunidad Autónoma de Madrid, España) y su zona de influencia más inmediata, se ha seleccionado por la presencia y calidad de sus valores naturales y socioculturales, ya que todo él es parte de la división natural entre las mesetas norte y sur en la zona centro de la Península Ibérica, convirtiéndose así en paso casi obligado entre las dos Castillas. Situada entre las sierras de Gredos y de Ayllón, este cordal se extiende como una sucesión de muros continuos de roquedos viejos en dirección suroeste-noreste por las provincias de Madrid, Segovia y Ávila, creando así un paisaje de enorme valor debido a la unión de

sus altas cumbres, sus aristas torreadas, sus circos y lagunas de origen glaciar, los amplios valles y laderas que los dominan y sus extensas arboledas y gargantas. A pesar de lo variado de sus elementos la Sierra de Guadarrama puede considerarse como una unidad homogénea desde el punto de vista orográfico, un cuerpo simple que se ha modelado a lo largo de milenios con una faceta natural y otra marcadamente humana, lo que ha imprimido en su fisonomía un fondo cultural perfectamente identificable a lo largo y ancho de sus valles, ríos y montañas. Su condición de frontera natural y estratégica ha hecho que, desde tiempos inmemoriales, sus habitantes trazaran distintas rutas para controlarla y franquearla.

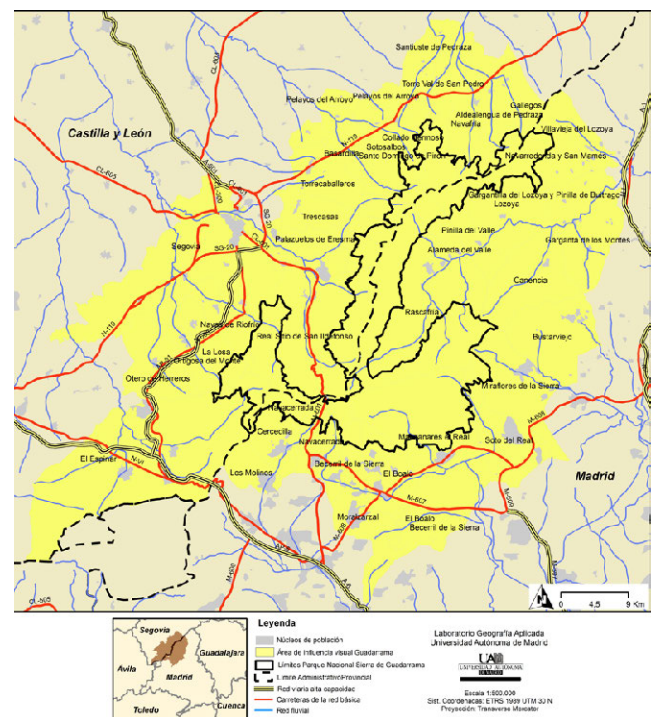


Figura 1. Mapa de situación del ámbito de estudio

Actualmente la Sierra de Guadarrama está atravesada por numerosos puertos de montaña, algunos de ellos con una altura superior a los 1.800 metros. Este hecho, unido a la proximidad de la ciudad de Madrid, hace que estas montañas tengan y hayan tenido una gran afluencia de montañeros y turistas, suponiendo una pérdida neta de valores del grandioso patrimonio natural, que por otra parte no ha hecho más que atraer a un creciente público desde la década de 1870, momento en el cual el paisaje se configura como el principio de mayor influencia para la toma de decisiones relacionadas con los usos y funciones históricas y actuales de la Sierra del Guadarrama (figura 1).

#### FUENTES

La presente investigación está fundamentada en el análisis perceptivo de los elementos del paisaje, para cuyo ajuste se ha procedido a trabajar previamente con información geolocalizada de tipo digital. En la conformación del modelo de decisión EMC han tenido una importancia capital las capas de criterios señaladas en la tabla I, donde se aporta información relativa tanto a sus características esenciales, el modelo de datos trabajado y la escala a la que se encuentra referenciada la información. Las capas, de libre acceso en las Infraestructuras de Datos Espaciales (IDEs), han sido descargadas del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y el Ministerio de Agricul-

tura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (Magrama). La normalización de cada una de la información contenida en las capas referidas se ha elaborado de acuerdo a la referencia de la máscara de límites municipales, de resolución 1:25.000 y proyección en sistema geodésico UTM30N-ETRS89.

**TABLA I**  
FUENTES DE DATOS UTILIZADAS

ELEMENTO	AUTOR	FORMATO	ESCALA/RESOL.	PROYECCIÓN
Lim. municipal	IGN	Vectorial/SHP	1:25000	UTM30N-ETRS89
Base cartog.	IGN/BTN100	Vectorial/SHP	1:100000	UTM29N-ETRS89
Modelo digital elevación	IGN/MTN25	Ráster/ASCII	25 m	UTM30N-ETRS89
Base ocupación del suelo	IGN/CLC12	Ráster/MMZ	1:100000	UTM30N-ETRS89
Mapa forestal español	MA-GRAMA MFES0	Ráster/SHP	1:50000	UTM30-ETRS89
Espacios naturales protegidos	MA-GRAMA	Vectorial/SHP	1:25000	UTM30-ETRS89

## II. MÉTODO

La Fragilidad Visual del paisaje del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama y el ámbito territorial de su entorno más inmediato se determinará, tal y como ya se ha comentado en los apartados anteriores, según una valoración directa del medio. En el proceso de valoración, que parte de la identificación de los elementos constituyentes del medio, se ha utilizado la metodología EMC para adaptar las decisiones procedimentales a las características del ámbito de estudio, otorgando para ello semejanza a los criterios paisajísticos naturales y a los de origen antrópico.

### DETERMINACIÓN DE LOS COMPONENTES

El estudio de la fragilidad visual del paisaje es, de forma indiscutible, una valoración del medio en la actualidad partiendo de la selección de los elementos o componentes que lo integran. En la determinación de estos componentes llevada a cabo en esta investigación ha influido prioritariamente el conocimiento previo del ámbito de estudio a través de trabajos de campo, así como una lectura sobre los modelos y metodologías de investigación sobre la fragilidad del paisaje para comprender qué clase de componentes y criterios se habían utilizado en investigaciones previas. Con todas estas premisas se elaboraron una serie de modelos o esquemas de valoración jerárquicos, de cuyo desarrollo emanó un modelo final en el que cada nodo de la red corresponde a un componente de valoración del medio. Este modelo, capaz de organizar con detalle los componentes que integran la realidad paisajística del entorno, se ha elaborado entorno a dos grupos principales de criterios: fragilidad visual intrínseca del paisaje y fragilidad visual extrínseca, partiendo de trabajos realizados anteriormente sobre la evaluación de la fragilidad visual del paisaje. Los dos grupos de criterios propuestos presentan las siguientes características:

- Fragilidad visual intrínseca: Fragilidad que deriva de las características inherentes del paisaje, es decir, las propiedades constitutivas del medio, tales como sus cualidades fisiográficas o los usos del suelo.
- Fragilidad visual adquirida: Aquella fragilidad que no depende exclusivamente de los valores innatos del territorio, si no que estará determinada por los observadores en fun-

ción de elementos antrópicos fijos del ámbito, las figuras de protección existentes y la accesibilidad del mismo.

A través de estos dos grandes componentes se ha vertebrado el estudio de la fragilidad visual del paisaje de la Sierra de Guadarrama, en un sistema de jerarquización que divide los dos componentes principales en criterios paisajísticos más concretos y simples de cuantificar (figura 2).

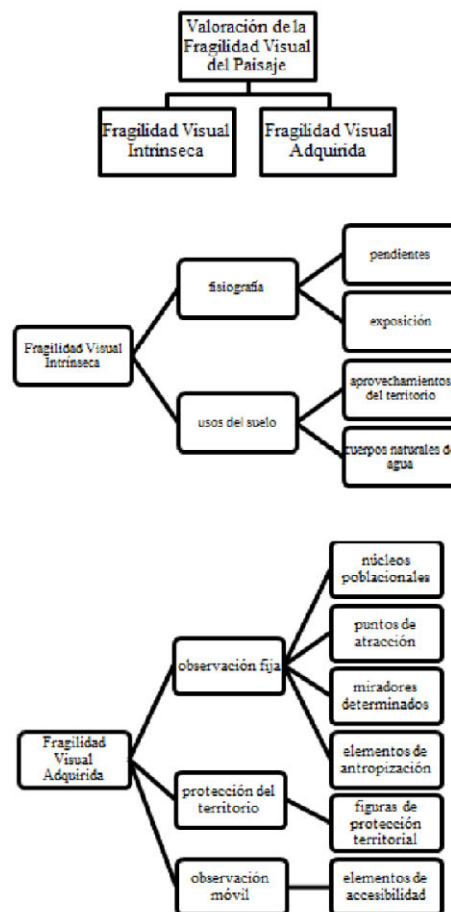


Figura 2. Modelo de valoración de la Fragilidad Visual

### NORMALIZACIÓN Y VALORACIÓN

Una vez definido el modelo de componentes a considerar en el estudio de paisaje deben establecerse unas pautas de valoración de cada valor integrante del modelo. La valoración se efectúa en una escala jerárquica similar para todos los componentes, de manera que cada uno de ellos es tratado de forma independiente. La explicación acerca de la gestión de la valoración y normalización de cada uno de los componentes del modelo se realizará a partir del desarrollo metodológico de un caso concreto, esto es, sobre el proceso de valoración y normalización realizada para el criterio de los aprovechamientos del territorio, extraída y trabajada a partir de la información digital contenida en las capas de Corine Land Cover 2012. De este modo, se propuso un sistema de valoración y normalización de los componentes y sus criterios en el que los valores expresados son cuantitativos, por lo que son comparables. La escala de valoración es de 0 como valor mínimo de fragilidad a 4 como valor máximo, intentando de esta forma maximizar todo lo posible la coherencia de contenidos y de resultados entre las dos escalas de trabajo ya mencionadas. En esta escala quedan definidas las 4 clases de valor (tabla II).



**TABLA II**  
NORMALIZACIÓN DE LOS VALORES DE FRAGILIDAD VISUAL

VALOR	FRAGILIDAD VISUAL
1	Reducida
2	Media
3	Alta
4	Muy alta/ Límite

**TABLA III**  
ASIGNACIÓN DE VALORES DE FRAGILIDAD VISUAL SEGÚN USOS DEL SUELO DEL CORINE LAND COVER 2012

USOS SUELO CLC_12	DENSIDAD	ALTURA	CROMATIS- MO	TOTAL
Bosque mixto	3	3	4	10
Bosque coníferas	2	4	3	9
Bosque frondosas	3	3	4	10
Cultivos regadío	1	2	3	6
Esp. Agrícolas vegetación natural	2	2	3	7
Escasa vegetación	1	1	2	3
Mosaico seco/regadío	3	2	3	8
Matorral transición	2	2	2	6
Matorral medit. esclerófilo	2	2	2	6
Olivares	2	2	2	6
Pastizales supraforestales naturales	3	2	3	8
Prados y praderas	3	2	4	9
Sistemas agroforestales adhesionados	2	2	3	7
Tierras de labor en secano	2	1	3	6

Una vez acotado el campo de información al área de estudio de interés se evalúan los diferentes usos en función de tres indicadores visuales que ayudarán a determinar la fragilidad de cada aprovechamiento: densidad, altura y cromatismo de la vegetación. Cada uno de estos tres indicadores será puntuado según la escala 1-4 de acuerdo a las determinaciones observadas por el evaluador en trabajo de campo, posteriormente se sumarán los tres valores de cada uso del suelo y se obtendrá un valor global (tabla III).

Para el análisis del criterio de los aprovechamientos del territorio se han tenido en cuenta, como ya se ha dicho, las densidades apreciables en la vegetación, la altura media a la que puede ser visibilizado cada uso y el cromatismo (gama de colores y riqueza de tonalidades predominante en la vista como factores que inciden en la calidad visual del punto de observación y percepción de la fragilidad del paisaje. En la percepción visual del paisaje, la propia percepción de las formaciones y/o elementos vegetales que son visibles desde un punto de observación es fundamental para valorar la fragilidad de un paisaje. De este modo, se ha propuesto un sistema de valoración y normalización de los componentes y sus criterios en el que los valores expresados son cuantitativos, por lo que son comparables. La escala de valoración es de 0 como valor mínimo a 4 como valor máximo, intentando de esta forma maximizar todo lo posible la coherencia de contenidos y de resultados entre las dos escalas de trabajo ya mencionadas. En esta escala quedan definidas las 4 clases de valor (tabla IV).

**TABLA IV**  
NORMALIZACIÓN DE LOS VALORES DE FRAGILIDAD DE LOS USOS DEL SUELO

RANGO DE VALORES	FRAGILIDAD VISUAL NORMALIZADA
≤3	1 fragilidad reducida
4-6	2 fragilidad media
7-8	3 fragilidad alta
9-10	4 fragilidad muy alta/límite

A esta metodología de valoraciones se adaptarán todas y cada una de las valoraciones que se realicen para todos los descriptores paisajísticos que el modelo de evaluación paisajístico propone para este trabajo.

**PONDERACIÓN DE LOS CRITERIOS Y APLICACIÓN DEL ALGORITMO EMC**

Cuando todos los criterios del paisaje objeto de esta investigación han sido evaluados según sus indicadores determinados, la labor del investigador consiste en discernir cuáles de estos criterios y componentes tienen predominancia sobre otros desde el punto de vista visual, ya que no todos tendrán la misma significancia/relevancia visual en el conjunto de la imagen paisaje analizada. Es en este punto donde surge la necesidad de clarificar, de un modo lo más sistemático y objetivo posible, de qué modo pasarán a ponderarse cada uno de los criterios y componentes del paisaje contemplados en el modelo de valoración. La ponderación de los criterios se define como el peso o importancia que se le atribuye a cada uno de los factores utilizados para el cálculo de la fragilidad visual del paisaje dentro del modelo diseñado para ello.

La valoración sobre la fragilidad visual del paisaje relativo al Parque Nacional del Guadarrama estará supeditada, de forma indefectible, a la asignación de ponderaciones que se le aporte, realizada esta bajo criterios aceptados por buena parte de la comunidad científica, probados en numerosos estudios sobre la calidad visual del paisaje o de valoraciones de impactos ambientales y pulidas con el conocimiento del ámbito de estudio del componente humano de este trabajo.

La asignación de ponderaciones aquí diseñada se ha desarrollado mediante la utilización del método Analytic Hierarchy Process (AHP) o Método Analítico Jerárquico. Este método se caracteriza porque descompone y organiza el problema de forma visual en una estructura jerárquica. El método establece la importancia relativa de los elementos de cada jerarquía a partir de la matriz de comparación por pares de (Saaty, 1980).

A cada par de variables se le asigna un valor de la escala entre 1/9 (extremadamente menos importante el primer criterio respecto al segundo) hasta 9 (extremadamente más importante el primer criterio respecto al segundo), expresados en la tabla V.

**TABLA V**  
ESCALA DE MEDIDA EN LAS COMPARACIONES ENTRE FACTORES

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
extrema	fuerte	moderada	igual	moderada	fuerte	extrema		
<i>menos importante</i>					<i>más importante</i>			

En la primera matriz se asignan los valores a cada par de variables que la componen (tabla VI).

**TABLA VI**  
MATRICES DE PONDERACIÓN DE LA FRAGILIDAD VISUAL INTRÍNSECA CALCULADOS MEDIANTE LA MATRIZ DE SAATY

	Observación fija	Observación móvil	Protección territorio
Observación fija	1	2	3
Observación móvil	1/2	1	2
Protección territorio	1/3	1/2	1

El cálculo de los pesos se obtiene de la suma de los valores de cada columna de la matriz. Después se divide cada elemento por el total calculado para su columna, obteniendo así la matriz de normalidad, y se calcula el promedio de los elementos de cada fila de esa matriz normalizada. Los valores medios son los pesos asignados a cada criterio.

	Observación fija	Observación móvil	Protección territorio
Observación fija	1	2	3
Observación móvil	0,5	1	2
Protección territorio	0,3	0,5	1
	1,8	3,5	6

	Observación fija	Observación móvil	Protección territorio	Peso (%)
Observación fija	0,55	0,58	0,5	50
Observación móvil	0,28	0,28	0,33	30
Protección territorio	0,17	0,14	0,17	20
	1,00	1,00	1,00	100

La tercera matriz es la matriz normalizada a suma 1, donde cada valor de una columna se divide por la suma de los valores de esa misma columna. Posteriormente se desarrolla el vector de prioridad de cada criterio calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada. Como resultado de este proceso se obtiene el peso de cada criterio (Zube, 1984). En la segunda matriz se han calculado los valores de las fracciones y éstos se han sumado columna a columna.

Según las determinaciones del AHP, una vez se ha procedido a la normalización de los factores mencionada en las líneas anteriores se calculan los pesos porcentuales de los mismos, con el objetivo de concluir con una integración de las capas de información de cada criterio a partir de la aplicación de un algoritmo de EMC. La metodología EMC se sirve, entre otras, de las técnicas compensatorias, basadas en el precepto de que un valor alto de una alternativa en un factor puede compensar un valor bajo de la misma alternativa en otro factor.

La Sumatoria Lineal Ponderada, como una de las técnicas EMC compensatorias, será la utilizada en este trabajo (Gómez y Barredo, 2005). Esta técnica procede asignando el valor en cada componente como resultado de la función de los componentes del nivel inferior que en él confluyen, La fórmula de la Sumatoria Lineal Ponderada es:  $R = \sum w \cdot v$

Donde (r) es el nivel de adecuación de la alternativa, (w) es el peso del criterio y (v) es el valor normalizado del factor. Como puede apreciarse en la figura 3, en el primer nivel de los dos grandes componentes de la fragilidad visual del paisaje se han estimado unas ponderaciones del 60% en el componente relativo a la fragilidad visual intrínseca, es decir, que los valores consustanciales del paisaje, no vinculados ni a la acción del hombre en el territorio ni a su papel como observador del territorio, tienen una influencia sobresaliente en el modelo de fragilidad sobre el cual pivota la presente investigación. Ello viene a reforzar la tesis de que buena parte de la fragilidad visual que pueda ostentar un determinado paisaje están vinculados fundamentalmente a las realidades fisiográficas y de dominancia de usos del suelo en el mismo.

El 40% restante de la ponderación del modelo de fragilidad visual confeccionado atañe a los componentes visuales adquiridos del paisaje, ligados a la acción del hombre y a su percepción como observador del paisaje. Dentro de este gran componente de la fragilidad visual queda patente que las principales determinaciones de este valor vienen dadas desde los factores de observación fija del territorio, debido a su permanencia y visibilidad en el ámbito guadarrameño.

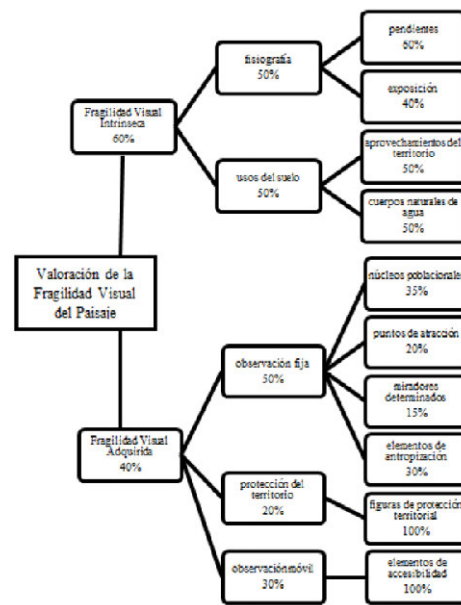


Figura. 3. Ponderación del modelo de Fragilidad Visual

### III. RESULTADOS

Producto de la aplicación del modelo de fragilidad visual y de la ponderación de los elementos del paisaje reseñados en el apartado metodológico, consistente de manera sucinta en la agregación de los valores de fragilidad obtenidos para los componentes visuales intrínsecos y adquiridos analizados, se elaboró una cartografía de la fragilidad visual del paisaje del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama y su área aledaña. En dicha cartografía quedó expresada la fragilidad visual del paisaje global de la zona mediante siete valores positivos, basándose en una escala valorativa que asignó a cada pixel del mapa de fragilidad visual una valoración positiva que iba desde el 4 al 10, siendo el 10 la máxima fragilidad visual obtenible en una cuadrícula del modelo ráster y 4 la mínima.

Con el objetivo de normalizar, estandarizar y hacer más legible el mapa resultante se procedió a realizar una última reclasificación del mapa, destinada a resolver los problemas de legibilidad derivados de un mapa que tenía una escala cromática de siete tonos, en la que las diferencias entre áreas de alta y las de baja calidad quedaban totalmente diluidas en una amalgama sin orden. Estas siete categorías, por lo tanto, se reclasificaron y agruparon en cuatro niveles de fragilidad visual, dando lugar al Mapa Final de la Fragilidad Visual del Paisaje del Parque Nacional de Guadarrama.

**TABLA V**  
DISTRIBUCIÓN DE LAS CATEGORÍAS DE FRAGILIDAD VISUAL EN EL ENTORNO ANALIZADO

CATEGORÍA	SUPERFICIE (HA)	%
Baja	23935	12,6
Media	40651	21,4
Alta	51858	27,3
Muy alta/ Límite	73513	38,7
TOTAL	189957	100

Más allá de lo interesante que resulta analizar por separado cada uno de estos datos porcentuales (tabla V), lo cierto es que se ha considerado prioritario en este apartado realizar una síntesis acerca del porqué de esta distribución. La valoración de fragilidad visual máxima, correspondiente al 38,7% del Mapa de Fragilidad Visual del Paisaje, aproximadamente unos

735 km<sup>2</sup>, tiene una distribución que abarca las intensidades de relieve menos acusadas, ya que de forma clara los datos de mayor fragilidad ocupan los piedemontes y áreas de fondo de valle o llanura meseteña, tanto en la vertiente de Madrid como en la de Segovia. Esta afirmación, si se relaciona la ponderación de la fragilidad intrínseca del paisaje con los resultados territorializados, viene reforzada por el hecho de que es precisamente en las zonas menos abruptas, con poca pendiente, áreas de llanura y fondos de valle, donde se ubican los aprovechamientos y usos del suelo de menor valoración paisajística, pues los elementos de máxima valoración de fragilidad, como pudieran ser los bosques o los pastizales de montaña tienen su ámbito geográfico enclavado en las estribaciones y macizos de la Sierra de Guadarrama. Atendiendo, por último, y a las relaciones entre el modelo de fragilidad visual adquirida y la distribución de la fragilidad visual muy alta en el ámbito de estudio cabe destacar que son precisamente las zonas con una fisiografía más favorable las que poseen una mayor densidad y tamaño de los núcleos de población, mayores elementos de antropización del paisaje y mayor densidad de redes y elementos de accesibilidad, así como una menor densidad de puntos de atracción visual, miradores para la observación fija del paisaje y un menor grado de protección del territorio mediante figuras normativas. Atendiendo muy concretamente al área de delimitación del Parque Nacional (figura 4) puede apreciarse que el uso intensivo de actividades de gran impacto visual ejercen una enorme presión sobre el paisaje en áreas como el entorno de los puertos de Navacerrada y Coto, con elevadas presiones y antropización del espacio por su accesibilidad y fragmentación de áreas protegidas; y los pinares y montes de Valsaín (Segovia) y del valle del Lozoya (Madrid), debido en ambos casos a la presión antrópica de los puntos de accesibilidad, la presencia de grande núcleos urbanos en el entorno, los usos del suelo intensivos de la zona y el menor grado de protección del territorio que presentan estas zonas circundantes al Parque Nacional propiamente dicho.

En cuanto a la fragilidad visual alta es importante comprender que la territorialización que ha resultado en el Mapa de Fragilidad Visual tiene detrás un claro reflejo emanado del modelo de análisis del paisaje. Esta afirmación se realiza por la clara vocación de mediación y conciliación entre los ámbitos que presentan una mayor fragilidad y los expuestos a una menor. Por eso la distribución concreta resultado del análisis global del ámbito de la Sierra de Guadarrama confirma que las fragilidades medias se encuentran, de forma muy general, en las inmediaciones de áreas con alta fragilidad, esto es, circundando núcleos urbanos, áreas deportivas de alta montaña, las infraestructuras y elementos de accesibilidad y conectividad. Al igual que ocurre con la distribución de los espacios con muy alta fragilidad, la fragilidad alta también se encuentra en gran medida repartida en las áreas de llanuras y penillanuras. Dentro de los límites del Parque Nacional (figura 4) se puede observar como los puertos de montaña, las estribaciones de la Mujer Muerta y el valle del Lozoya son áreas en las que predomina, al igual que en los enclaves de los montes de Valsaín, los Cotos y la línea de cumbres de la vertiente serrana de Madrid, debido fundamentalmente a las presiones visuales y de accesibilidad e intensidad de usos turístico-recreativos que se suceden en estas áreas concretas.

Al igual que en el análisis de los resultados extraídos para la distribución de las fragilidades visuales altas y muy altas, la interpretación que puede realizarse sobre la el reparto territorial de los valores de fragilidad media guardan una muy estrecha relación con las determinaciones especificadas en el modelo de toma de decisiones y la ponderación de los diferentes

componentes del paisaje analizados. Ello tiene un claro reflejo en cómo se distribuyen al áreas con fragilidad media en el ámbito de influencia paisajística del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama, ya que, como puede apreciarse, se han definido como áreas de media fragilidad aquellas que poseen una cualidades fisiográficas pronunciadas y bien definidas, con un grado de pendiente y exposición solar/visual elevadas, y en las que comienzan a ser predominantes los usos silvícolas, de mosaico agroforestal y de pastizal. Como cabe esperar estas zonas de ladera y piedemontes o de cumbre soportan una menor presión antrópica, ya que la densidad y tamaño de los núcleos de población disminuye ostensiblemente en relación con las zonas de relieve más suave. Como consecuencia de ello también en estas zonas de fragilidad media se encuentran menores capacidades de accesibilidad y de otros elementos de distorsión y antropización visual del medio. Los datos volcados arrojan la cifra aproximada del 20% de territorio analizados bajo la consideración de fragilidad media, aunque su distribución en el mapa final esté concentrada en cuatro grandes ámbitos insertos dentro de la delimitación del Parque Nacional: el entorno de la Sierra de la Mujer Muerta y los bosques y Parques de San Ildefonso, el macizo de la Pedriza y la Cuerda Larga y sus estribaciones de los Altos del Hontanar y Collado Hermoso y, por último, el gran macizo central de las cumbres de Peñalara, Puerto del Reventón, y de Calderuelas.

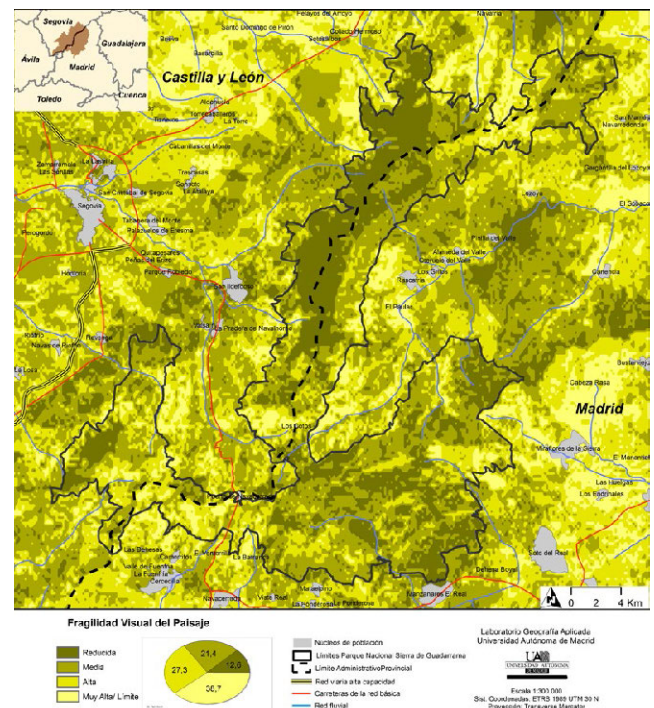


Figura 4. Mapa final de la Fragilidad Visual del paisaje

Para concluir, es necesario realizar un análisis de los resultados relativos a los valores de fragilidad visual baja medidos en el entorno del Parque Nacional de la Sierra de Guadarrama (figura 4). Algo más del 12% del territorio analizado, unos 239 km<sup>2</sup>, ha arrojado unos bajos indicadores de fragilidad, es decir, que la presión antrópica que soportan estos ámbitos territoriales es baja y que, por tanto, la tendencia la degradación de los paisajes desde el punto de vista ambiental y visual está muy limitada y sus amenazas son contenidas. Como podrá apreciarse las áreas que han arrojado menores valores de fragilidad visual coinciden, de forma casi íntegra, con las fisiografías más pronunciadas y abruptas, esto es, con zonas de cumbres serranas, valles internos, circos glaciares

y áreas periglaciares, laderas boscosas o zonas de fondo de valle, riberas de cursos fluviales u otras áreas y entornos protegidos como bosques, cotos de caza, embalses o montes de utilidad pública. Más concretamente en el área de delimitación del Parque Nacional se aprecian tres grandes entornos en los que los bajos valores de fragilidad visual denotan, de manera muy complementaria, áreas en las que también la calidad global de los entornos paisajísticos es muy elevada, tales como las zonas cumbreiras de Peñalara, Siete Picos, la Cuerda Larga, la Najara, un gran ámbito de los plegamientos y murallas graníticas de la Pedriza de Manzanares y algún área más difuminada en el sector oeste del Parque, ya en el entorno del macizo de la Mujer Muerta, en Segovia, todos ellos sin duda parajes de una muy limitada pero creciente afectación antrópica, con unos elevados estándares de calidad ambiental y visual, con claros y evidentes rasgos de atalaya desde los cuales apreciar y valorar los elementos de atracción visual del ámbito y en los que tienen un papel fundamental los componentes de observación fija y de protección del territorio del criterio de fragilidad visual adquirida del modelo propuesto.

#### IV. CONCLUSIONES

Desde el punto de vista de la aplicación, se demuestra una vez más que los estudios de calidad y de fragilidad visual del paisaje son fundamentales para una correcta ordenación del territorio, especialmente en espacios naturales en los que es prioritaria la política de conservación de la naturaleza, y en aquellos en los que son compatibles usos como las actividades turístico-recreativas o el uso público con la conservación de los recursos naturales. Sin duda estudios como este, vinculados a la percepción del paisaje, proporcionan información para disminuir la presión humana sobre determinados sitios de gran valor ecológico donde se concentra tradicionalmente el uso público, indicando parajes alternativos con una elevada atracción. En este sentido, la fragilidad visual del paisaje, junto a otros recursos, es frecuentemente empleada como criterio para señalar zonas que deben ser preservadas frente a actuaciones que suponen un cierto impacto ambiental.

En la actualidad es cierto que la inmensa mayoría de técnicas de evaluación de la fragilidad visual del paisaje son criticadas por su subjetividad, por el reducido y característico ámbito territorial o de conocimiento al que son aplicadas. Esta investigación ya partía de la premisa de que no existe una técnica de valoración del paisaje correcta que excluya a las demás y que la mayor parte de los trabajos se basan en métodos subjetivos pero sistemáticos. La parcialidad con respecto a la valoración del paisaje se hace aún más patente si cabe cuando variables de tipo estético y cultural, relacionadas con la percepción humana, entran a formar parte de la ecuación de la calidad/fragilidad visual. El desarrollo de la metodología indirecta de evaluación que aquí se presenta tiene un claro sesgo vinculado a la relevancia y grado de participación de los parámetros que constituyen su modelo. Dicho sesgo está indiscutiblemente asociado a la dirección y elección de los componentes del paisaje estudiados y los enfoques de fragilidad aportados. Únicamente mediante la exigencia de un mayor y más certero conocimiento del medio objeto de estudio por parte del equipo gestor y una incorporación más exhaustiva de parámetros paisajísticos y la importancia relativa dada por medio de las ponderaciones realizadas aportará una solución eficaz capaz de, por lado, ofrecer una alternativa menos sesgada y, por otro, ajustarse más a las exigencias y peculiaridades del complejo espacio analizado.

La propuesta metodológica aquí expuesta nace como aspiración de ser una pauta más que ayude a determinar el valor que

presenta el paisaje de un espacio tan concreto como puede ser el ámbito de la Sierra de Guadarrama dentro del Sistema Central Ibérico, pero en todo momento la investigación ha considerado necesaria la elaboración de un completo método de valoración con rangos y criterios bien establecidos, que sea una herramienta más en el campo de la valoración perceptual del paisaje desde el punto de vista de la disciplina geográfica.

#### REFERENCIAS

- Antrop, M. (2005). Why landscapes of the past are important for the future. *Landscape and Urban Planning*, 70, págs 21-34. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016920460300207X>
- Cancer, L. (1994). Aproximación crítica a las teorías más representativas de la ciencia del paisaje. *Geographicalia*, págs 17-34. <http://bddoc.csic.es:8080/detalles.html?tabla=docu&bd=GEOURBI&id=240949>
- Cifuentes, P. (1979): La Calidad Visual de Unidades Territoriales. Aplicación al valle del río Tiétar. Tesis Doctoral. E.T.S. de Ing. de Montes. Universidad Politécnica, Madrid.
- Fuente de Val L, G., Atauri, J.A. y De Lucio, J.V. (2004). "El aprecio por el paisaje y su utilidad en la conservación de los paisajes de Chile Central". *Ecosistemas*, nº2. págs 82-89.
- Galiana, F. y Vallés, M. (2007). La planificación del paisaje en la comunidad valenciana: análisis de la calidad y fragilidad visual. Universidad de Valencia. págs 111-125.
- Gómez, M. y Barredo, J. I (2005): Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Madrid, Ed. Ra-Ma. págs 37-53.
- Malczewski, J. (2004): "GIS-based land-use suitability analysis: a critical overview". *Progress in Planning*, nº 62, págs 3-65.
- Mérida, M. (1996). El paisaje visual. *Baetica*(18), págs 205-222. <http://hdl.handle.net/10630/9334>.
- Ocaña, C. y Galacho Jiménez, F. B. (2002): "Un Modelo de Aplicación de SIG y Evaluación Multicriterio, al Análisis de las Capacidad del Territorio en Relación a Funciones Turísticas" Universidad de Málaga. Págs 58-71.
- Orán Cáceres, J.P., Gómez Delgado, M. y Bosque Sendra, J. (2010): "Una propuesta complementaria de análisis de sensibilidad de un modelo basado en técnicas SIG y evaluación multicriterio". En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica: La Información Geográfica al servicio de los ciudadanos*. Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Sevilla. Págs. 971-987
- Ormaetxea, O. (1997). Concepto y método en paisaje. Una propuesta docente. *Lurralde*(20), págs 333-344. Obtenido de <https://www.ingeba.org/lurralde/lurranet/lur20/20ormae/20ormae.pdf>
- Pérez Albert, Y. et al. (2015): "Propuesta metodológica para el análisis de la calidad visual del paisaje. El caso de la comarca de El Priorat" *Congreso Age-Unizar 2015*. Págs 797-806.
- Saaty, T.L. (1980): *The Analytic Hierarchy Process*. New York, McGraw Hill. págs 245-264.
- Santos, J. M. (1997): "El planteamiento teórico multiobjetivo/ multicriterio y su aplicación a la resolución de problemas medioambientales y territoriales, mediante los S.I.G. Raster". *Espacio, Tiempo y Forma, Serie VI, Geografía*, nº10, pp 129-151.
- Santos, J. M., y Cocero, D. (2006): *Los SIG raster en el campo medioambiental y territorial: ejercicios prácticos con IDRISI y MiraMon*. Madrid, UNED. Págs 89-103.
- Valpreda, C. (2007): "Sistema de Información Geográfica (SIG)-teledetección y evaluación multicriterio (EMC) en un estudio de evaluación de impacto ambiental (EIA)", *Memorias XI Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica*, págs 29-31.
- Zube, E.H (1984). "Themes in Landscape Assessment Theory". *Landscape Journal*, nº 3. pp.104-110.

# Tecnologías de Información Geográfica en el diagnóstico territorial participativo con comunidades indígenas. Caso de estudio en territorios Mapuche Lafkenches de Tirúa (38°20'S y 73°30'W), Chile

Fuenzalida Díaz Manuel<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geografía /  
Facultad de Ciencias Sociales /  
Universidad Alberto Hurtado  
Calle Cienfuegos # 41, Santiago,  
Chile  
mfuenzal@uahurtado.cl

## RESUMEN

Se describe la experiencia de diagnóstico y problematización territorial con enfoque comunitario que se elaboró en conjunto a comunidades Mapuche Lafkenches de Tirúa, en el litoral sur de la región del Bío-Bío [38°20'S y 73°30'W], Chile.

Se trabajó con cuatro comunidades (Kellgko; Lorenzo Quintrileo; Milla Rayen; Alto Primer Agua), utilizando diversas técnicas participativas como transecto o caminata de campo, cartografías participativas, entrevistas en profundidad e historias de vida, mapas de usos de suelo, biografía de cultivos, Evaluación Multicriterio, compartiendo su cotidianidad y reflexionando las distintas experiencias de vida. Las herramientas tecnológicas utilizadas corresponden a GPS, Imágenes Satelitales, QGIS y EasyAHP.

Se advierte la necesidad urgente de reforestar en espacios que presentan altos niveles de erosión, con especies nativas, que sirvan para recuperar suelos. Se reconoce la preocupación por mantener un uso sustentable en el tiempo del bosque nativo de manera de contribuir al equilibrio del territorio desde un enfoque ecosistémico e intercultural. Se construye un diagnóstico en que los saberes de la comunidad son la base fundamental para la construcción de información territorial.

Los intereses y necesidades de las comunidades indígenas pueden ser espacializados con TIG. Cada comunidad propone una estrategia distinta para la resistencia al monocultivo forestal, lo que revela la importancia de la construcción e intervención social de abajo-arriba.

Palabras clave: **Diagnóstico territorial participativo, Tecnologías de la Información Geográfica, Comunidades indígenas, Chile.**

## ABSTRACT

*The experience of diagnosis and territorial problematization with a community-based approach it is described, which was developed jointly with Mapuche Lafkenches communities of Tirúa, on the southern coast of the Bio-Bio region [38°20'S and 73°30'W] Chile.*

*Work has been done with four communities (Kellgko; Lorenzo Quintrileo; Milla Rayen; Alto Primer Agua), using various participatory techniques how transects or field walks, life histories, land use maps, crop biography, Multicriteria Assessment, sharing their daily*

*life and reflecting the different life experiences. The technological tools used correspond to GPS, Satellite Images, QGIS and EasyAHP.*

*There is an urgent need to reforest areas with high levels of erosion, with native species that serve to recover soils. Concern is recognized for maintaining a sustainable use of native forest over time to contribute to the balance of the territory from an ecosystemic and intercultural approach. A diagnosis is constructed in which the knowledge of the community is the fundamental basis for the construction of territorial information.*

*The interests and needs of indigenous communities can be spatialized with Geographic Information Technologies. Each community proposes a different strategy for resistance to forest monoculture, which reveals the importance of a bottom-up approach of social intervention and construction.*

**Keywords:** *Participative territorial diagnosis, Geographic Information Technologies, Indigenous communities, Chile.*

## I. INTRODUCCIÓN

Se describe la experiencia de diagnóstico y problematización territorial con enfoque comunitario que se elaboró en conjunto a comunidades Mapuche Lafkenches de Tirúa, en el litoral sur de la región del Bío-Bío [38°20'S y 73°30'W], Chile. Este espacio está dominado por un modelo de producción forestal de monocultivo, heredado por el Decreto Ley 701 de 1974 promulgado por la dictadura militar de Pinochet, que mantiene en constante tensión a las comunidades con el Estado y los empresarios (Donoso et al, 2015).

Este modelo industrial de plantación de árboles como pinos (pino radiata) y eucalipto (eucalipto globulus) -especies exóticas de rápido crecimiento- en extensas áreas geográficas, tiene como finalidad abastecer mercados externos de madera, carbón, leña, troncos y celulosas (Gonzales, 2015), desplazando sistemáticamente el bosque nativo y generando diversos efectos medioambientales en las comunidades mapuches como: acidificación de los suelos, pérdidas de nutrientes y agotamiento de los recursos hídricos, lo cual se traduce en una creciente desertificación del territorio, pérdida de la riqueza natural, deterioro de la biodiversidad y destrucción de ecosistemas (Programa Chile Sustentable, 2004, p.19).

Actualmente, las políticas públicas, los programas y proyectos en general, tienen una lógica de construcción e intervención social de relaciones asimétricas de poder entre Estado y comunidad (Martínez, 2006), en el que no se da una articulación efectiva entre las estructuras y funcionamientos de la institución y las comunidades indígenas (Martínez, 2006; Rubilar & Roldan, 2014). Tal lógica, opera de igual forma en los modelos de producción extractiva en América Latina, generando profundos conflictos socioambientales y niveles agudos de injusticia ambiental, en particular, en comunidades indígenas que habitan zonas rurales ricas en recursos territoriales, profundizando el enraizamiento de relaciones asimétricas entre comunidad y Estado.

En particular para la comuna de Tirúa, el 48% de la superficie total comunal es de uso forestal (Censo Forestal Agropecuario, 2007) perteneciendo a dos grandes empresas del rubro; Mininco y Arauco. Ello ha significado conflictos territoriales producto de la ocupación de predios indígenas que actualmente se encuentran bajo dominio de empresas forestales. Esto ha originado procesos de resistencia en contra de la expansión del monocultivo y defensa de la naturaleza, "enmarcada en la reconstitución y re-emergencia de las identidades étnicas como defensa y preservación ante procesos de desestructuración materiales e inmateriales de las condiciones de reproducción sociocultural" (Pineda, E. p.182).

La explotación del bosque nativo en territorios ancestrales ha dado origen a conflictos entre el desarrollo del sector forestal y la preservación del bosque nativo (PLADECO Tirúa, 2009) o Mawida y de la reproducción social, material y cultural del pueblo Mapuche, en el sentido de su cosmovisión en su concepción de territorio. De acuerdo a la cosmovisión Mapuche todos los árboles y toda la naturaleza son sagrados y desde esa visión la explotación forestal representa la pérdida del espíritu del bosque y de la cultura ancestral. Por lo cual existe un daño directo a la producción social y simbólica del pueblo, puesto que amenaza el carácter simbólico e identitario que las comunidades tienen con la tierra y con los elementos naturales como el Mawida. De esta manera, la relación con la naturaleza busca el equilibrio a través de un vínculo armónico, donde el pueblo Mapuche antes de llevar a cabo cualquier trabajo que interfiera con la naturaleza, ya sea cortar un árbol o iniciar una siembra, pide permiso a Ngenechen "dueño de los hombres", a quien también deben agradecer (FUCOA, 2014). En efecto, todo territorio es sagrado y concebido "no solo como un espacio geográfico donde se habita, sino como ámbito en el que los seres humanos y la naturaleza constituyen un todo indivisible, un círculo equilibrado de vida. La relación seres humanos y naturaleza se piensa circular, armónica y basada en el principio de la reciprocidad -se da y se recibe a la vez-" (Agosto, P & Briones, C. 2007, p. 296).

De esta manera, la relación con la naturaleza se encuentra regida por una serie de nociones simbólicas, junto a una serie de principios ecológicos y culturales, que representan los pilares fundamentales de la noción de kúme mogñen o buen vivir (Hasen, 2014). De esto último, es que la pérdida de suelo y de bienes naturales como el agua y el bosque nativo representan para las comunidades mapuches una situación medioambiental que influye en la salud de la comunidad (PLADECO Tirúa, 2009). En este sentido, es necesario entender que la cosmovisión del pueblo mapuche, es el punto de partida desde el cual se debe entender la salud y el modelo medicinal ancestral, pues implica una relación directa entre el ser humano y su entorno conformando una unión armónica indisoluble (Hasen, 2012).

Por ello es que diversos actores locales advierten la necesidad urgente de reforestar en espacios que presentan altos niveles de erosión, con especies nativas, que sirvan para recuperar suelos y proteger el agua para consumo humano. De esta manera, se plantea la preocupación por mantener un uso sustentable en el tiempo del bosque nativo de manera de contribuir al equilibrio del territorio desde un enfoque ecosistémico e intercultural. Este enfoque tiene la "capacidad de articular de manera armónica el medio ambiente, la sociedad humana y la economía, entendiendo los ecosistemas en sus vinculaciones al desarrollo humano" (Hasen, 2012, p.105).

Por todo lo anterior, la presente propuesta de trabajo pretende construir información territorial con enfoque comunitario a fin de aportar en las iniciativas de resistencia al monocultivo forestal en territorios Mapuche Lafkenches. El enfoque comunitario pretende romper la relación experto/institución y no experto/comunidad, bajo encuadre positivo, lo que equivale a emerger las capacidades, competencias, habilidades, recursos y potencialidades. Aquí la apuesta es poner en valor la sabiduría (de la comunidad) por sobre el saber (del experto).

En el apartado siguiente se detalla la metodología adoptada. Luego se describen los resultados alcanzados por la utilización de distintos instrumento y técnicas desde la Geografía, para terminar con una sección de conclusiones.

**II. MÉTODO**

Se trabajó con cuatro comunidades asentadas en el medio rural. Comunidad Kellgko en la localidad de San Ramón (Sector Norte). Comunidad Lorenzo Quintrileo en la localidad de Quidico (Sector Centro). Comunidad Milla Rayen en la localidad de Las Misiones (Sector Sur) y finalmente, Comunidad Alto Primer Agua (Sector Sur).

El uso de TIG en el diagnóstico territorial participativo con pueblos indígenas, requiere de dos fases metodológicas (ver Figura 1).

En la **Fase 1: Terreno**, en cada uno de los territorios y en conjunto con la comunidad, se emplearon diversas herramientas participativas, las cuales permitieron mediante reflexiones de los participantes, comprender y reconocer las necesidades y dinámicas territoriales, en un contexto local sobre el impacto del monocultivo forestal para proponer estrategias comunitarias de reforestación y protección de las nacientes de aguas para restaurar sistemas ecológicos degradados. Entre las herramientas utilizadas por el equipo investigativo se encuentran (1) los transectos o caminatas de campo, empleando tecnología GPS; (2) Cartografías participativas, entrevistas en profundidad e historias de vida; (3) Mapas de usos de suelo y biografías de cultivo, usando tecnología SIG (software QGIS).

En la **fase 2: Laboratorio**, se empleó una sistematización desde de las experiencias participativas, entendiéndolas como procesos complejos en los que intervienen diferentes actores, en un contexto económico-social determinado y en un momento institucional del cual forman parte.

Para ello se llevó a cabo la (4) Construcción de mapa base, recurriendo a archivos vectoriales disponibles en la IDE nacional ([www.ide.cl](http://www.ide.cl)), y a información construida en Openstreetmap. También se emplearon archivos ráster consistentes en imágenes satelitales Landsat obtenidas del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), y datos SRTM (NASA) para la construcción de un modelo de elevación digital que permitiera (5) delimitar cuencas hidrográficas (software GRASS, comando `rwatershed`). La importancia que tiene conocer el componente de cuenca hidrográfica es fundamental, ya es un proceso de planificación que busca guiar el manejo integrado de recursos naturales de una cuenca, posibilitando “procesos de gestión ordenados, articulados e informados, conducentes a optimizar los impactos positivos de las intervenciones, desde el punto de vista social, económico y ambiental, todo ello en pos del bienestar presente y futuro de la sociedad” (PROT, 2011, p.20).

Finalmente, se aplicó (6) Evaluación multicriterio para priorizar restauración ecológica con bosque nativo (software QGIS, complemento EasyAHP).

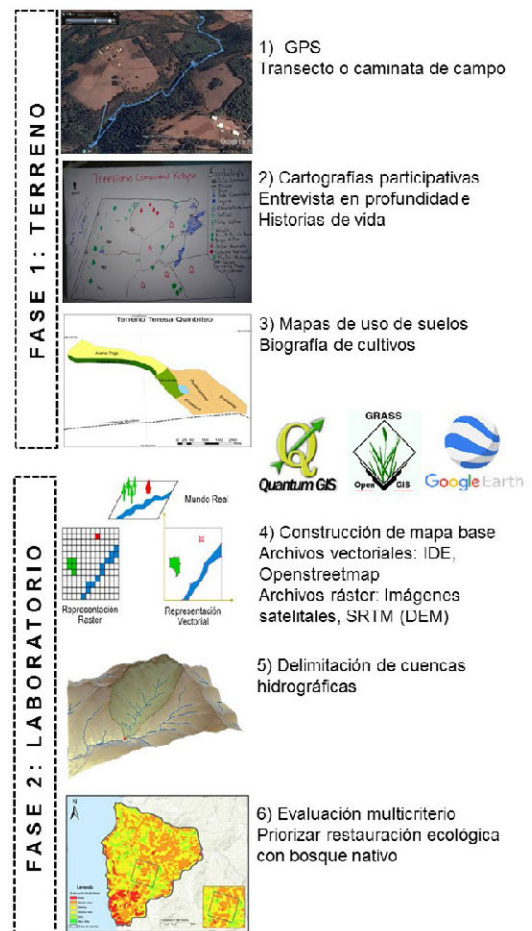


Figura. 1. Proceso metodológico.

**III. RESULTADOS**

Los resultados de la Fase 1: Terreno, se pueden observar en la Tabla I. En términos territoriales, un ejemplo de producción de información territorial se muestra en la Figura 2.

**TABLA I**  
RESUMEN DE PRINCIPALES RESULTADOS DE LA FASE 1: TERRENO

ACTIVIDAD	RESULTADOS DE LA ACTIVIDAD.
Transectos o Caminata de Campo.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reconocimiento de la realidad a escala local, en un contexto rural.</li> <li>Identificación del uso actual de los recursos, además de la caracterización de los terrenos y la presencia de sitios de significancia cultural para los habitantes de cada sector.</li> <li>Reconocimiento de vegetación nativa.</li> </ul>
Cartografías participativas.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Descripción y análisis de los componentes ambientales del entorno inmediato de cada una de las comunidades.</li> <li>Identificación de actividades económicas, predios, plantaciones forestales, agrícolas, esteros, nacientes de agua.</li> <li>Visualización de las problemáticas y oportunidades de cada sector.</li> </ul>
Entrevista en Profundidad e Historia de vida.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identificación de puntos comunes entre actores relevantes para la comunidad, principalmente para quienes desempeñan funciones en beneficio de la comunidad, además del reconocimiento de hechos trascendentales en la vida de los participantes.</li> <li>Cruce de información territorial y las necesidades comunitarias</li> </ul>
Mapas de usos de suelo y biografías de cultivos.	<ul style="list-style-type: none"> <li>Conocer el historial de cultivos en la comunidad, en el sentido de las variedades tradicionales que se han ido usando, y la introducción de otras variedades. Permite entender mucho acerca de los cambios, y la toma de decisión de los agricultores.</li> </ul>

**Comunidad Kellgko**  
**Localidad de San Ramón**

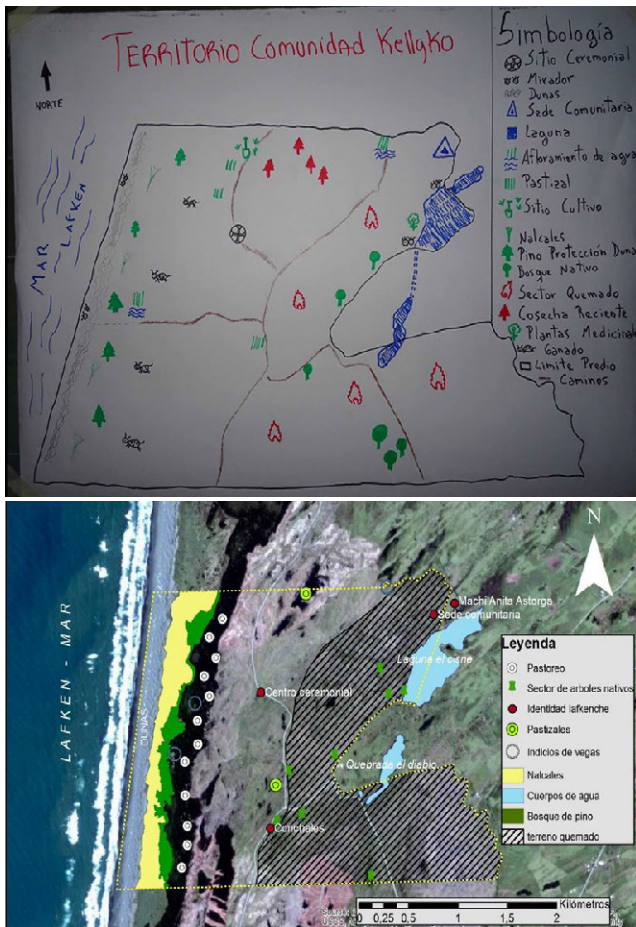


Figura 2. Ejemplo de producción de información territorial.

Los resultados de la **Fase 2: Laboratorio**, se pueden consultar en las Tablas II y III. Especialmente, la información construida con el diagnóstico territorial participativo se puede observar en las figuras 3, 4, 5 y 6.

**TABLA II**  
**RESUMEN DE PRINCIPALES RESULTADOS DE LA FASE 2: LABORATORIO**

ACTIVIDAD	RESULTADOS DE LA ACTIVIDAD.
Construcción del mapa base	<ul style="list-style-type: none"> <li>Proyecto SIG con las siguientes capas vectoriales: Áreas sensibles, caminos, clase de uso de suelo, erosión actual, erosión potencial, localidades pobladas, predios rurales, vegetación.</li> <li>Capas ráster: DEM, Pendiente, Imágenes satelitales Landsat años 1975, 1979, 1986, 1987, 1998, 2000, 2002, 2007, 2008, 2009, 2010, 2011, 2013, 2016</li> </ul>
Delimitación de cuencas hidrográficas	<ul style="list-style-type: none"> <li>Individualización de cuencas de primer, segundo y tercer orden abastecedoras de agua y cobertura de bosque nativo.</li> <li>Identificación de drenes hídricos, pozos y tranques de captación, junto con elementos significativos del uso de la cuenca.</li> </ul>
Evaluación Multicriterio	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diseño de un modelo priorizar las áreas a restaurar con bosque nativo.</li> <li>Utilización de variables uso de suelo, erosión actual, erosión potencial, pendiente, distancia a drenes.</li> <li>Definición de propuestas de intervención.</li> </ul>

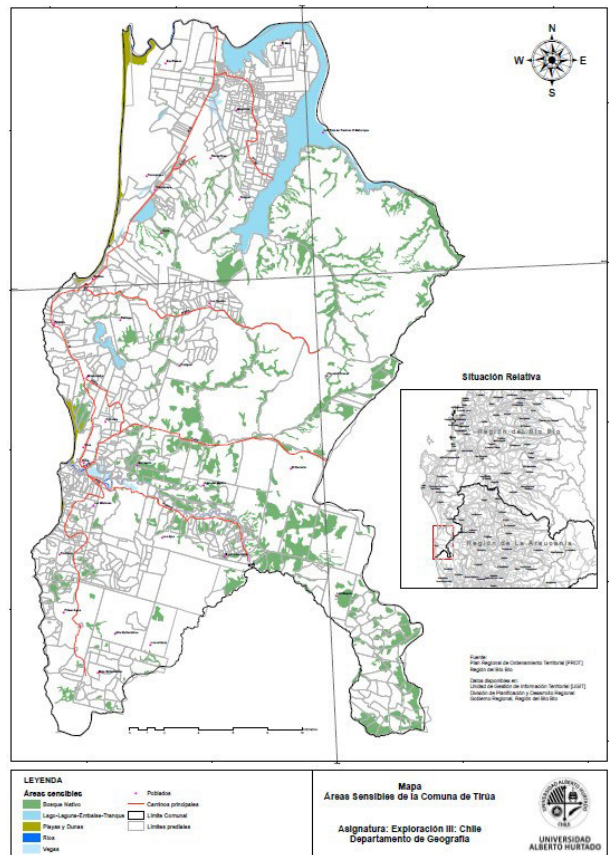


Figura 3. Mapa Áreas Sensibles.

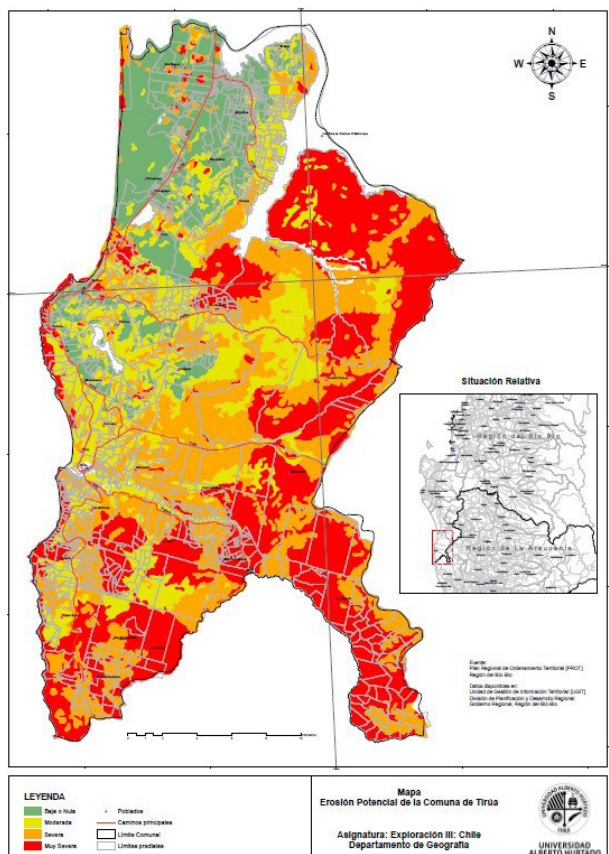


Figura 4. Erosión potencial.



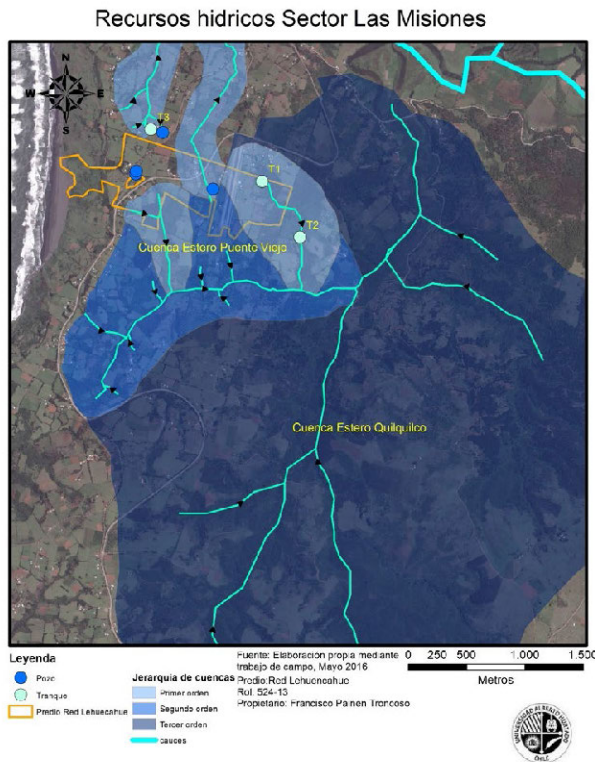


Figura 5. Ejemplo de delimitación de cuenca hidrográfica.

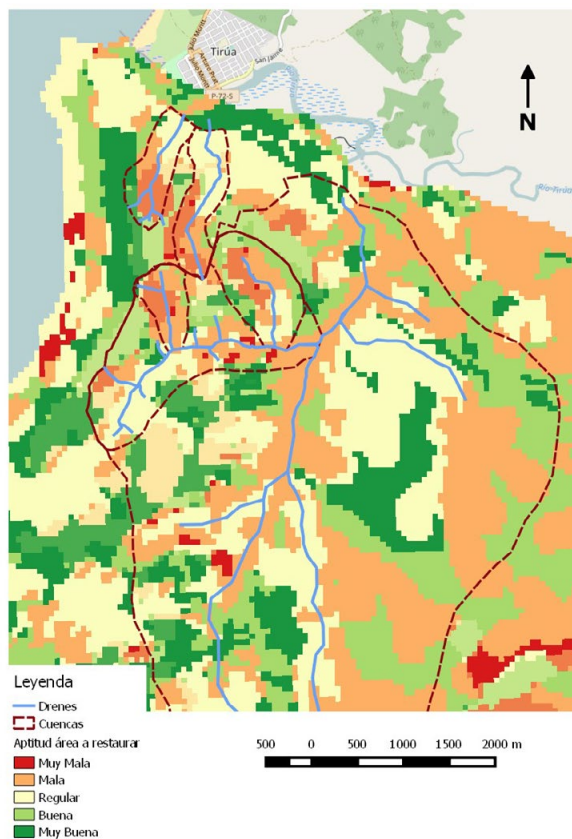


Figura 6. Ejemplo de aptitud territorial para restaurar cuencas hidrográficas con bosque nativo.

TABLA III  
RESUMEN DE PROPUESTAS DE INTERVENCIÓN

ACTIVIDAD	RESULTADOS DE LA ACTIVIDAD.
Cercado del dren	• Instalación y/o mejoramiento del cercado existente en los alrededores del dren para evitar la intervención de los animales que pastorean en el lugar y de esta forma evitar la alteración tanto del curso hídrico como del suelo continuo a este.
Eliminación de plantaciones introducidas a 50 metros del dren a intervenir	• Eliminación efectiva de plantaciones de eucaliptus y pino en las cercanías de la zona que se intervendrá para evitar pérdida de agua por estas especies
Plantación de especies nativas	• Plantación de especies nativas de acuerdo a las necesidades o importancia que la comunidad tengan sobre estas

IV. CONCLUSIONES

Se advierte la necesidad urgente de reforestar en espacios que presentan altos niveles de erosión, con especies nativas, que sirvan para recuperar suelos. Se reconoce la preocupación por mantener un uso sustentable en el tiempo del bosque nativo de manera de contribuir al equilibrio del territorio desde un enfoque ecosistémico e intercultural. Se construye un diagnóstico en que los saberes de la comunidad son la base fundamental para la construcción de información territorial.

Los intereses y necesidades de las comunidades indígenas pueden ser espacializados con TIG. Cada comunidad propone una estrategia distinta para la resistencia al monocultivo forestal, lo que revela la importancia de la construcción e intervención social de abajo-arriba.

## AGRADECIMIENTOS

Se deja expreso reconocimiento a la participación del equipo docente y estudiantes en torno a la asignatura Exploración III, de 5to año de la carrera de Geografía de la Universidad Alberto Hurtado.

Equipo docente: Dr. Manuel Fuenzalida Díaz (principal), Dr. Nicolás Rojas (Asociado), Msc© Felipe Salinas (Asociado) y Susana Huenul (I. Municipalidad de Tirúa)

Estudiantes: *Comunidad Kellgko en la localidad de San Ramón*: Lucas Alcayaga, Carlos Cavieres, Juan Fredes, Jorge Moscoso, Ricardo Pérez, Camilo Romero.

*Comunidad Lorenzo Quintrileo en la localidad de Quidico*: Angela Bernal, Javiera Bravo, Tomás Bravo, Sebastián Carrasco, José Fuentes, Ignacio Milic

*Comunidad Milla Rayen en la localidad de Las Misiones*: Héctor Cayún, Viviana Díaz, Esteban Espinoza, Francisca Flores, Nicolás Quezada

*Comunidad Alto Primer Agua*: Alexander Acosta, Miguel Castellani, Paulina Guerra, Anakena Orrego, Francisco Terraza, Daniela Sepúlveda.

## REFERENCIAS

Agosto, P. y Briones, C. (2007). Luchas y resistencias mapuche por los bienes de la naturaleza. En OSAL (Buenos Aires: CLACSO) Año VIII, N° 22, septiembre.

Donoso, P., Romero, J., Reyes, R. y Mujica, R. (2015). Precedentes y efectos del neoliberalismo en el sector forestal chileno y transición hacia un nuevo modelo. En Pinol (Ed.) Democracia versus neoliberalismo. 25 años de neoliberalismo en Chile. LOM Ediciones.

FUCOA. Fundación de Comunicaciones, Capacitación y Cultura del Agro, . (2014). Mapuche. Serie introducción histórica y relatos de los pueblos originarios de Chile. Santiago.

Gonzales, M. (2015). ¿Agua para quién? Escasez hídrica y plantaciones forestales en la provincia de Arauco. Chile. Recuperado de <http://www.mapuexpress.org>

INE (2007). Censo agropecuario y forestal. Resultados por comuna. Chile. Recuperado de <http://historico.ine.cl>

Martínez, V. (2006). El enfoque comunitario. El desafío de incorporar a la comunidad en las intervenciones sociales. Santiago: Universidad de Chile.

Hasen, F. N. (2012). La noción de Kume mogñen en el pueblo mapuche: aproximaciones desde un enfoque ecosistémico. Kula. Antropólogos del Atlántico sur, 96-114.

Hasen, F. N. (2014). Desarrollo y BuenVivir desde un Enfoque Ecosistémico: La experiencia local de Lago Neltume, Chile. Sustentabilidades, 10, 1-23.

Pineda, E. (2012). Dominación y emancipación en el pueblo mapuche. El pensamiento de la Coordinadora Arauco Malleco. SubHistoria N°4, 43-71.

PLADECO. I. Municipalidad de Tirúa. (2009). Plan de desarrollo comunal. Tirúa. Región del Bio Bío

Programa Chile Sustentable. (2004). Impactos ambientales en Chile: Desafíos para la Sustentabilidad. LOM Ediciones.

PROT (2011). Plan Regional de Ordenamiento Territorial. Contenidos y procedimientos. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE), Chile.

Rubilar, G. y Roldán, A. (2014). Áreas de Desarrollo Indígena: estudio de caso del ADI Puel Nahuelbuta, como estrategia de las políticas públicas en el mundo mapuche. Universum, vol.29, n.2, pp.253-276.

# Impacto de los incendios forestales en las áreas protegidas de Costa Rica

Moraga Peralta Julio César

Escuela de Ciencias Geográficas/  
Facultad de Ciencias de la Tierra y  
el Mar/Universidad Nacional  
Campus Omar Dengo/Heredia/Costa  
Rica  
julio.moraga.peralta@una.cr

## RESUMEN

Los incendios forestales constituyen problemas que ocasiona grandes daños ambientales sobre los ecosistemas, uno de los mayores impactos en el ambiente son los efectos sobre el cambio climático, situación que acentúa los problemas globales que atentan la vida sobre el planeta. Notoriamente se reconoce que los incendios son un agente constante de cambios sobre los paisajes naturales y por tanto su estudio reviste importancia ya que afectan de una manera notable la vegetación, la fauna, el suelo y aumentan el peligro de desertificación, que ello conlleva a los problemas socioeconómicos.

Este artículo tiene por objetivo analizar el impacto de los incendios forestales en las áreas protegidas de Costa Rica, a partir de variables explicativas como la proximidad carreteras, tipos de usos de la tierra, focos de incendios, insolación y altitud sobre el nivel de mar, modeladas con técnicas de Evaluación Multicriterio (ECM) en un Sistema de Información Geográfica (SIG).

Dado que el concepto riesgo se refiere a una condición de probabilidad, en este artículo se recrea escenarios en donde podría tener lugar el fuego, los cuales se correlacionan con eventos que se han presentado en años anteriores. Se debe advertir que no considera la variable viento como factor dispersor del fuego, ya que el objetivo es determinar lugares con condición favorable a incendio sin mediar los factores que contribuyen en su distribución.

Palabras clave: **incendio forestal, problema ambiental, riesgo, sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio.**

## ABSTRACT

*Forest fires are a problem that causes environmental damages on the ecosystems. One of the biggest impacts in the atmosphere are the effects on the climatic change, situation that accentuates the global problems that attempt the life on the planet. Historically, fires are recognized as constant agent of changes on the natural landscapes. Therefore fires studies are important, in the way, how they affect the vegetation, the fauna, the soils and expand the dry conditions that tight link to poverty. This article aims to analyze the impact of forest fires on Costa Rica protected areas, based on explanatory variables such as proximity to roads, types of land uses, fire fires, sunshine and altitude above sea level, Modeled with*

*Multicriteria Evaluation (ECM) techniques in a Geographic Information System (GIS). Since the concept risk refers to a condition of probability, in this article model different scenarios where could carry out the fire, which are correlated with events that had been occurred in previous years. It should be noticed that it does not consider the variable wind as a propagate factor of the fire, since the objective is to determine places with adequate condition to fire without the factors that contribute in its distribution mediating.*

**Key words:** *fire forest, environmental problem, risk, geographical information system and evaluation multicriterio.*

### III. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales causan daños económicos, afectan el suelo, alteran los ciclos hidrológicos, provocan serios deterioros a los ecosistemas forestales y a la biodiversidad y aportan carbono a la atmósfera, contribuyendo en el calentamiento global de la tierra. Aunque en condiciones naturales los incendios forman parte del proceso dinámico de los ecosistemas. Ferreras, J. Estada. P. Herrero T. Martín M.A. (2001).

En Costa Rica, durante la época seca de cada año, se concentra la mayor cantidad de incendios forestales. Según la Comisión Nacional sobre Incendios Forestales, las principales causas de incendios obedecen a vandalismo, quema de pastos, quemas agropecuarias (para sembrar frijol, por ejemplo) y quema para promover la caza. (La Nación, 24 de enero de 2008).

No obstante, Villalobos (2000), basado en datos de la Comisión Nacional sobre Incendios Forestales, señala que el problema real se origina por el uso descontrolado del fuego para fines agrícolas y ganaderos. Advierte que existe dificultad para determinar las causas reales de la mayoría de los incendios forestales. No obstante, expertos señalan que estos se deben a la mala utilización del fuego en actividades agropecuarias, y en menor porcentaje, por prácticas de cazadores, venganzas y negligencias. Otras causas son debidas a altas temperaturas o tormentas eléctricas sobre materiales de fácil combustión, aunque estos ocurren de forma muy esporádica, sin embargo no dejan de ser una causa real de generación de incendios.

Las áreas protegidas han sido escenario de gran cantidad de incendios, por ello, es importante determinar su potencial a través de modelos probabilísticos según sus características geográficas analizadas con técnicas de ECM y SIG. Estos últimos constituyen un medio tecnológico que articula varias disciplinas con el fin de realizar análisis, creación, adquisición, almacenamiento, edición, transformación, visualización, distribución, etc., de información geográfica. En el caso particular, a través de ellos se pueden desarrollar planes de prevención y vigilancia ante incendios forestales.

Se analizan los elementos y factores geográficos que configuran en territorio costarricense, lo cual permite diagnosticar la incidencia y la problemática de incendios forestales, posteriormente se explican los conceptos teóricos y metodológicos, se analizan los resultados y por último se discute el impacto sobre los ecosistemas.

### IV. MÉTODO

A continuación se explica el modelo metodológico para abordar el problema, el mismo parte del reconocimiento de cinco variables explicativas tales como: proximidad a las carreteras, altitud sobre el nivel del mar, la insolación, focos de incendios y uso de la tierra. La base metodológica se derivó del modelo presentado por Ordoñez y Martínez (2003). La información cartográfica a priori la constituyen diferentes coberturas en formato vectorial, así como fotografías aéreas del año 2005

del proyecto Costa Rica Airborne Research and Technology Applications (CARTA) e imágenes de satélites Landsat y Aster de los años 2006 y 2008 respectivamente, las cuales son la base para generar las diferentes categorías de uso de la tierra.

La red de caminos fue obtenida del mapa base de Costa Rica del Instituto Geográfico Nacional (IGN) y se complementó con la digitalización de vías a partir de la interpretación de fotografías aéreas, la resultante fue transformada en una cobertura de distancias a vías. También se contó con la cobertura de curvas de nivel con equidistancias cada 20 metros del IGN. En ellas los valores de altitud se presentan de manera discreta por lo que fue necesario realizar procesos de interpolación para generar un modelo digital de elevaciones sobre el nivel del mar. A partir del modelo digital de elevaciones, se deriva la orientación de las laderas la cual es utilizada para analizar la insolación, esta es combinada el registro de horas sol recibida obtenido del Instituto Meteorológico Nacional (IMN) de Costa Rica. En la tabla 1 se muestra la forma en que se reclasifica la orientación y las horas sol.

**TABLA 1**  
Clasificación de orientación de la ladera vrs horas sol.

ÁNGULO	ORIENTACIÓN	HORAS SOL	VALOR
-1	Zonas planas	6	5
0° - 23°	Norte	4	1
23° - 68°	Noreste	4	2
68° - 113°	Este	7	3
113° - 158°	Sureste	5	4
158° - 203°	Sur	7	8
203° - 248°	Suroeste	5	4
248° - 293°	Oeste	7	3
293° - 338°	Noroeste	4	2
338° - 360°	Norte	4	1

Fuente: Adaptado de Ordoñez Celestino y Martínez Alegría Roberto (2003)

Se contó con información referente a puntos de calor a través de Alertas Globales de Incendios de la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) y MODIS Rapid Response - Global Fire Information Management System (GFIMS). Recuperado de <http://maps.geog.umd.edu/firms/> el mismo se complementó con un registro de focos de incendios en formato vectorial del MINAE. El mismo tenía observaciones desde 1 a 13 años. Para el caso de estudio se consideró incluir en el análisis aquellos focos superiores a cuatro años, con el fin de asegurar la certeza en cuanto a la presencia de un evento.

A partir de las imágenes Landsat y Aster se obtuvo la cobertura de uso de la tierra mediante el método de clasificación supervisada, las categorías obtenidas constituyen la base para analizar sobre qué tipo de usos tienen mayor incidencia los incendios.

Definidas las variables explicativas se construye un modelo matemático que relacione las variables independientes o explicativas con una variable dependiente, para ello se realiza una regresión logística múltiple, la cual considera como de-

pendiente una variable dicotómica, que será la presencia o no de focos de incendios. Además se incorporan las variables explicativas las cuales pueden ser de cualquier tipo, en este caso tenemos tres cuantitativas (elevaciones, insolación y distancia a carreteras) y una nominal (usos de la tierra).

Mediante una regresión logística multivariante expresada en la ecuación 1, se determina la probabilidad de que se origine un incendio en un punto cualquiera de Costa Rica y establece que la variable dependiente sea igual a 1.

**Ecuación 1. Regresión logística.**

$$P(Y = 1) = \frac{\exp(\sum \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_3 X_3)}{1 + \exp(\sum \alpha + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_3 X_3)}$$

Siendo Y la variable dependiente y X<sub>1</sub> las variables independientes y α y β números reales.

El modelo de regresión logística asume que se cumpla una hipótesis básica en donde P sigue una curva logística, para una única variable independiente X.

La probabilidad de incendio se expresa mediante la ecuación 2.

**Ecuación 2. Determinación del mapa de probabilidad**

$$\text{logit}(Y) = \ln \frac{P}{1-P} = \alpha + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_n X_n \Rightarrow P = \frac{e^{\text{logit}(Y)}}{1 + e^{\text{logit}(Y)}}$$

Para obtener el riesgo final se reclasificó el mapa de probabilidad de acuerdo a la tabla 2.

**TABLA 2**

Categorías de riesgo ante incendios según probabilidad

PROBABILIDAD	RIESGO	CATEGORÍA
0 - 0,000001	1	Nulo
0,000001 - 0,25	2	Bajo
0,25 - 0,50	3	Medio
0,50 - 0,75	4	Alto
0,75 - 1	5	Muy alto

Fuente: Adaptado de Ordoñez, 2003.

A continuación se presentan los resultados obtenidos según el modelo explicado en el marco metodológico.

**V. RESULTADOS**

**5.1 DISTANCIA A CARRETERAS**

En Costa Rica, los medios de comunicación y el transporte han marcado un acelerado desarrollo en obras de infraestructura pública y privada tales como, la red vial para el transporte de personas y de mercancías. Históricamente el territorio costarricense gira alrededor de tres vectores; la existencia de rutas y caminos desde tiempos precolombinos y la carretera interamericana que conecta de manera eficiente el territorio nacional. Desde esta perspectiva, la cobertura de carreteras constituye un tema de líneas el cual ocupa prácticamente todo el territorio, presentando una menor densidad en las áreas protegidas, las cuales son consideradas un factor de riesgo de incendios ya que se asocian al tránsito de fumadores.

El análisis de distancias se derivó de la transformación del vector de red vial a raster y consistió en asignar a cada celda la distancia de la entidad más cercana del conjunto de celdas analizadas, esto se logró mediante la ayuda de un SIG. En la figura 1 se muestra que las mayores distancias a partir del centro de celda se localizan en las áreas con menor densidad de caminos, las cuales coinciden con los espacios de protección en donde no existe gran cantidad de vías de acceso.

Al compararlas junto a la cobertura de focos de incendios se determina que las carreteras constituyen una variable que aportan de forma decisiva en la ocurrencia de incendios, ya que algunos de los focos registrados muestran una estrecha relación con estas.

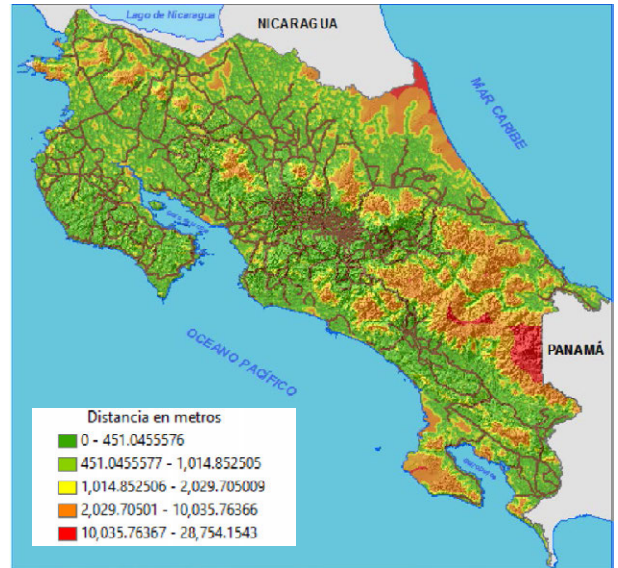


Figura 1: Costa Rica - Distancia Vías

**5.2 ELEVACIONES**

Las elevaciones se determinaron a partir de la interpolación de valores de altitud del mapa base de Costa Rica del IGN a escala 1:50.000, con la ayuda de SIG se realizó un proceso matemático que permitió predecir el valor de altitud transformando un número finito de observaciones en espacio de superficie continua, con ello se obtuvo un modelo digital de elevaciones (MDE). Las altitudes del territorio nacional van desde el nivel de mar hasta los 3818 msnm.

En la figura 2 se muestra en color verde considerable extensiones de tierras bajas, situación que determina su influencia directa en el comportamiento de las condiciones de temperatura, favoreciendo un calentamiento de la superficie por la acción del sol, lo que repercute directamente en el desarrollo de incendios.

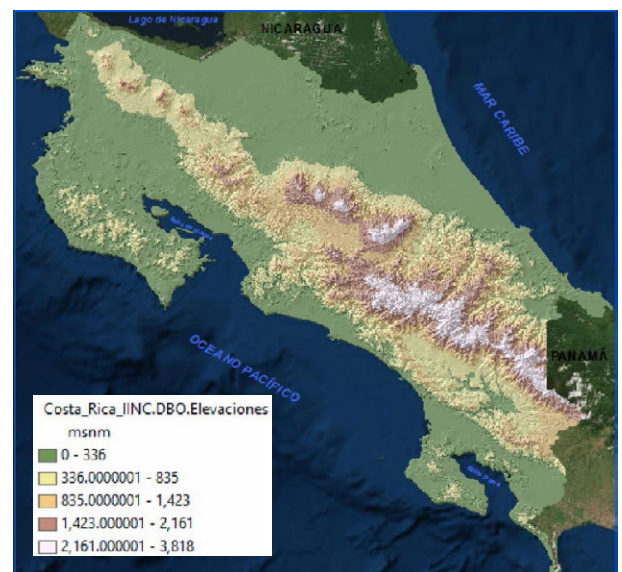


Figura 2: Costa Rica - Elevaciones

### 5.3 INSOLACIÓN

A partir del MDE se derivó la orientación de las laderas, es decir, la exposición o dirección de la pendiente definida por una celda y sus ocho vecinos circundantes. La interpretación de este dato permitió establecer áreas en donde se pueda originar un incendio en un punto determinado.

Es evidente que las áreas con orientación hacia el sur son las que están más expuestas al sol, no obstante para afianzar este criterio se correlacionó la orientación con los datos de brillo solar, y se estimó la cantidad de horas sol que reciben ciertas áreas en función a la dirección de la ladera. Lo anterior permitió determinar que las laderas orientadas al norte, noreste y noroeste reciben 4 horas sol, las orientadas al este y oeste, así como sureste y suroeste reciben hasta 5 horas sol, mientras que las zonas planas reciben 6 horas sol y las laderas orientadas a sur reciben hasta 7 horas diarias de energía solar, siendo la mayor cantidad recibida en nuestro país.

Con esto se determinó que la radiación solar es un factor que influye sobre estas áreas a lo largo del tiempo y por ende favorece el desarrollo de incendios forestales.

En la figura 3 se observa que debido a las características geomorfológicas algunas áreas reciben hasta siete horas de sol al día, sin embargo las áreas que tiene mayor dominio son las que reciben hasta seis horas sol, su espacio es ocupado por las llanuras presentes en el territorio nacional, en muchos casos estas áreas son dedicadas a las actividades agrícolas y pecuarias. El patrón de uso conjugado con la cantidad de horas sol por unidad de superficie constituye un factor determinante en el disparo de incendios.



Figura 3: Costa Rica - Horas Sol

### 5.4 FOCOS DE INCENDIOS

A partir del registro histórico suministrado por MINAE, además de los datos recopilados de puntos de calor se logró determinar la presencia de 681 focos de incendios algunos de los cuales se alinean cerca de las carreteras, mientras que otros se conjugan con las particularidades del uso de la tierra. La importancia de esta cobertura para el estudio es la condición temporal con que ocurren las quemadas en Costa Rica, se constata que muchos de ellos tienen un periodo de retorno anual,

principalmente durante la época seca de diciembre a abril de cada año.

Durante esta época la temperatura se incrementa unido a ellos existen ciertas prácticas agrícolas que requieren procesos de quema como por ejemplo, la caña de azúcar que es incinerada para su posterior cosecha, por lo tanto algunos de los focos de incendios observados tienen su origen en estas áreas. En la figura 4 se muestra la distribución geográfica de los puntos de ignición, concentrados en su mayoría en el sector noroeste de nuestro país, área geográfica que cubre la provincia de Guanacaste.

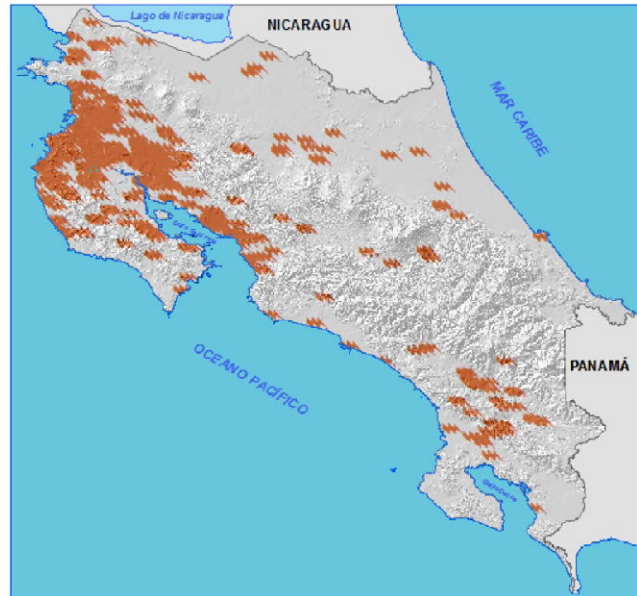


Figura 4: Costa Rica - Focos de Incendios

### 5.5 USOS DE LA TIERRA

A partir de las imágenes de satélite Landsat y Aster se determinaron 16 categorías de uso de la tierra, siendo la categoría de pastos y pastos con árboles las que presentan mayor dominio en la presencia de incendios.

El uso de la tierra constituye una variable de vital importancia para la determinación de las áreas con riesgo de incendios, para ello se analizó la relación existente entre los diferentes usos y la presencia de focos de incendio. Esto se logró mediante una tabulación cruzada, en donde se determinó que los usos que tienen mayor incidencia a las quemadas son los pastos, ya que de los 36 focos de incendios registrados al menos 23 tienen su origen en estas áreas, seguidos del charral y tacotal con 18 focos y 16 en la categoría de bosque secundario, por este motivo y dado que una gran extensión del territorio nacional tiene este tipo de uso centraremos el estudio en ellos. En la figura 5 se muestra el resultado obtenido mediante SIG, la categoría seis corresponde a pastos y es sobre esta en donde se da la mayor propensión de los incendios.

Cross-tabulation of focos_incendios (columns) against uso_tierra (rows)			
	0	1	Total
0	3830415	0	3830415
1	656910	5	656915 Bosque primario
2	985604	16	985620 Bosque secundario
3	96821	2	96823 Manglar
4	1009055	19	1009073 Charatal y tacotal
5	4151	1	4152 Plantación forestal
6	1693574	23	1693597 Pastos
7	11989	0	11989
8	393255	10	393265 Caña
9	630	0	630
10	176979	6	176985 Arroz
11	3745	0	3745
12	54	0	54
13	277965	7	277972 Terreno descubierto
14	53014	0	53014
15	4288	0	4288
16	3860	0	3860
17	41990	0	41990
18	8775	0	8775

Figura 5: Tabulación cruzada de focos de incendios versus usos de la tierra.

Fuente: Elaboración propia a partir de la cobertura de uso de la tierra vrs focos de incendios.

En la figura 6 se muestra la distribución espacial de las diferentes categorías de uso, se evidencia que la categoría de pastos y pastos con árboles tienen gran representatividad espacial, por lo tanto fueron agrupadas para realizar el análisis.

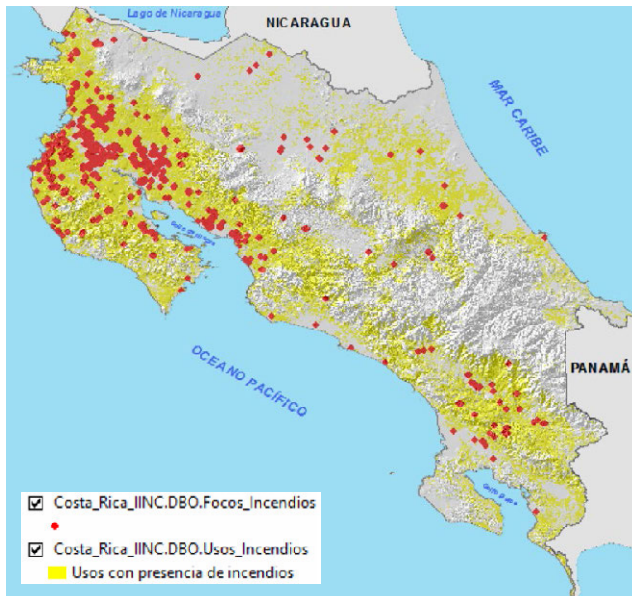


Figura 6: Costa Rica - Distribución espacial del uso de pastos

### 5.6 PROBABILIDAD DEL RIESGO A INCENDIOS

Los incendios forestales constituyen una de las principales amenazas en el territorio nacional estos se conjugan con las características físicas geográficas y la presión humana motivada por las actividades agropecuarias. A partir de las variables analizadas se obtuvo los coeficientes del modelo de regresión logística y se estableció la probabilidad de la variable dependiente. En dicho modelo se asume una hipótesis básica en donde la probabilidad sigue una curva logística o en forma de S, la cual es una función matemática que se utiliza para modelar la propagación de los incendios forestales.

El modelo de regresión logística fue introducido en un SIG, para ello la variable dependiente se transformó a dicotómica, es decir, la matriz de datos raster asumió valores entre 0 y 1, en donde 1 se refiere a los casos de igniciones observadas y 0 para puntos aleatorios en donde no se ha presentado incendios, por esta razón fue necesario construir una cobertura de puntos distribuidos aleatoriamente con valores de 0 y se unió a la cobertura de focos de incendios, la resultante constituyó

la capa muestra para el modelo de regresión. Es importante advertir que para obtener buenos resultados en la regresión logística la capa muestra debe estar equilibrada, es decir, debe haber un número semejante con valores de 1 y 0.

Los coeficientes obtenidos de la ecuación de regresión se expresan a continuación.

$$\text{logit}(\text{focos\_incendios}) = -0.9821 - 0.000259*d\_vias + 0.198545*insolación - 0.004594*mde - 1.068334*pastos$$

En donde:

d\_vías = Distancia a carreteras (-0.00025926)

Insolación = Orientación de la ladera con horas sol (0.19854472)

mde = Modelo digital de elevaciones (-0.00459415)

pastos = Categoría derivada del mapa de usos de la tierra. (-1.06833377)

El resultado de la regresión indica que la variable insolación tendrá mayor importancia en la solución final. Partiendo de dichos coeficientes se obtuvo la probabilidad de ocurrencia de un incendio, la misma asume valores que van desde 0,002229562 a 0,736122549, tal y como se muestra en la figura 7, en donde la mayor probabilidad se da en las áreas planas, situación que puede explicarse por la influencia de la insolación unido a los factores antrópicos resultante de las actividades agropecuarias, mientras que la probabilidad se reduce conforme se aumenta en altitud sobre el nivel medio del mar. Esta situación tiene estrecha relación con la acción de los elementos climáticos, siendo el mayor contenido de humedad en las partes altas de la cordillera que cruza el territorio de noroeste a sureste en donde existe una menor intensificación de las actividades humanas.



Figura 7: Costa Rica - Probabilidad de incendios forestales

Con el anterior índice de probabilidad se reclasifico el riesgo ante incendios de acuerdo a lo establecido en la cuadro tabla 2, particularizado para cada espacio de protección, de esta manera se obtuvo cuatro indicadores de riesgo los cuales cualitativamente va desde bajo a muy alto, como se puede apreciar en la figura 8.

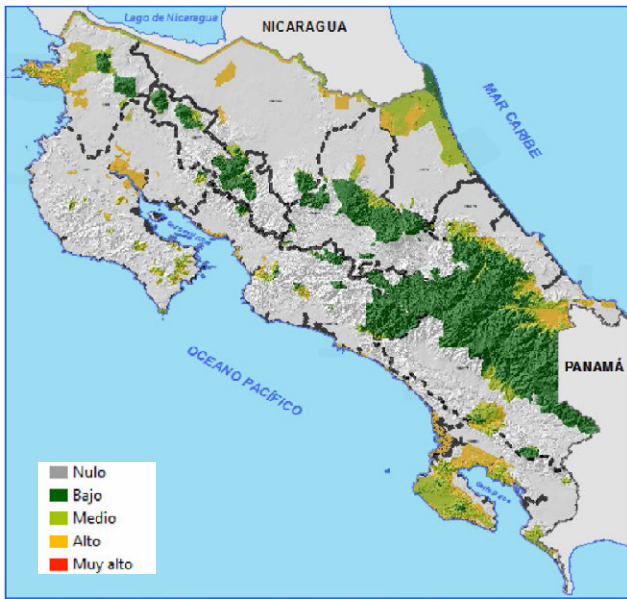
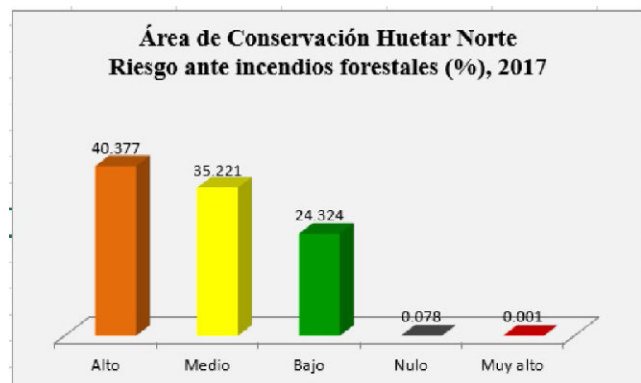
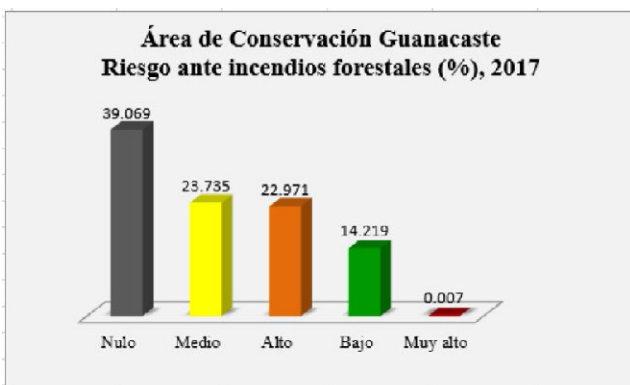
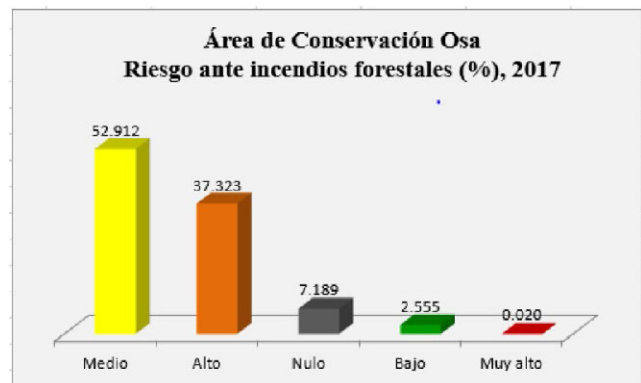
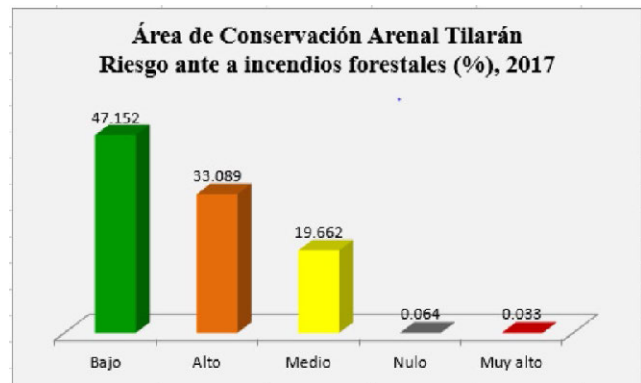
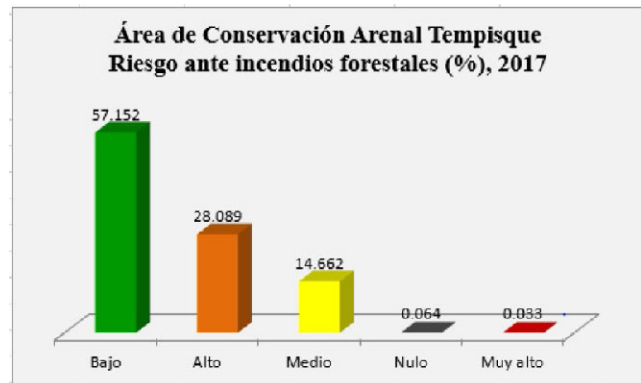


Figura 8: Costa Rica – Riesgo ante incendios forestales en espacios protegidos

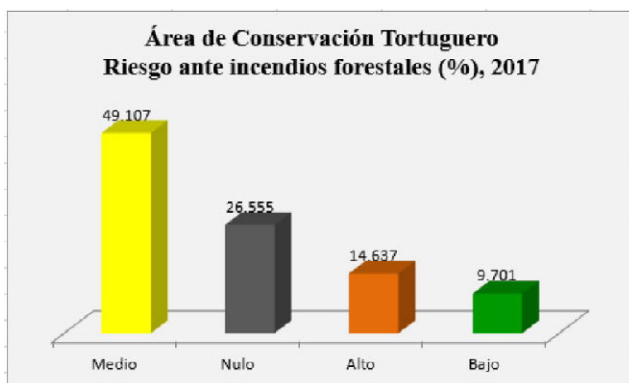
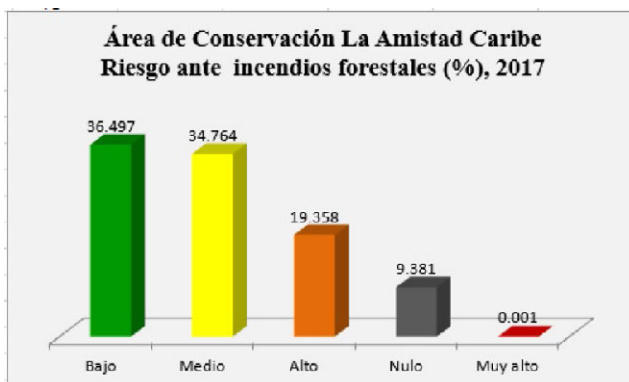
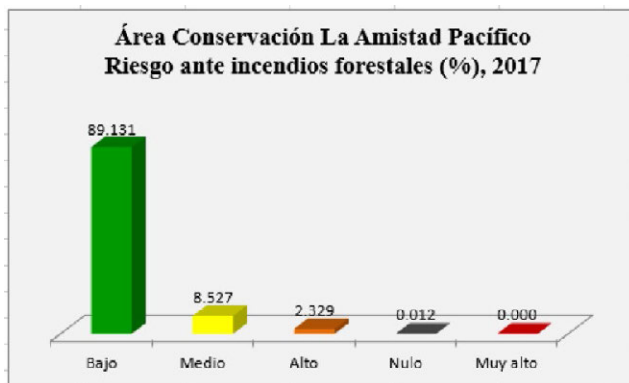
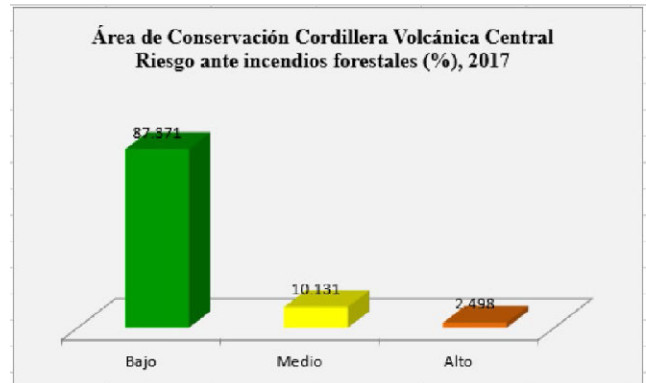
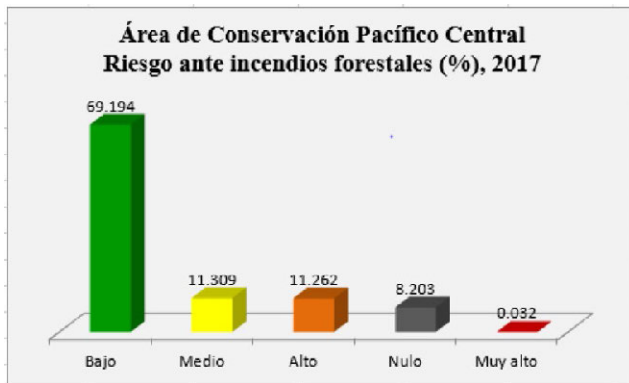
El riesgo fue caracterizado para las diez áreas de conservación existentes en Costa Rica:

1. Área de Conservación Guanacaste
2. Área de Conservación Arenal - Tempisque
3. Área de Conservación Arenal - Tilarán
4. Área de Conservación Osa
5. Área de Conservación Huetar Norte
6. Área de Conservación Pacífico Central
7. Área de Conservación La Amistad Pacífico
8. Área de Conservación La Amistad Caribe
9. Área de Conservación Tortuguero
10. Área de Conservación Cordillera Volcánica Central.

En las siguientes gráficas se muestran las categorías de riesgo ante incendios forestales en porcentaje según área de conservación.







En las anteriores gráficas puede observarse siete de las áreas de conservación presentan condiciones de riesgo considerable, principalmente las ubicadas en la vertiente del pacífico, se exceptúan las áreas de conservación Huetar Norte, Tortuguero y la Amistad Caribe, estas dos últimas ubicadas en la vertiente del caribe costarricense que también presentan un inminente riesgo ante incendios forestales.

Es importante resaltar que los espacios protegidos de Costa Rica, están amenazados por incendios forestales, ello significa que muchas especies de flora y fauna son vulnerables a este tipo de fenómenos, por lo que se requiere tener mayor control en los procesos de mitigación y atención de estos eventos.

**VI. CONCLUSIONES**

Se reconoce que existen impactos ambientales en los ecosistemas del medio físico, biológico y humano, así como en los aspectos socioeconómicos que justifican la supresión, prevención, detección y combate de incendios descontrolados, ya que desde el punto de vista económico y ecológico Costa Rica posee un valor económico muy alto en cuanto a especies de flora y fauna se refiere.

A pesar de que el impacto apreciable después de un incendio son las pérdidas de calidad paisajística por la desaparición de la cubierta vegetal, el daño va más allá ya que sus consecuencias superan el ámbito local del terreno quemado ya que los efectos impactan en aspectos sociales, económicos y ambientales, lo cual conlleva al deterioro y la pérdida de los recursos naturales, así como a la contaminación del aire y agua, degradación y erosión de los suelos, algunas pérdidas económicas y destrucción de infraestructura. También pueden provocar problemas de salud a las personas que se ubican en zonas aledañas al incendio.

Los incendios forestales representan parte de los problemas que enfrentan las áreas protegidas de Costa Rica, en ocasiones son producidos por actividades humanas de manera involuntaria o en forma premeditada; a veces como resultado de un problema de desigualdad social, carencia de tenencia de la tierra, falta de una cultura de uso adecuado del fuego o bien, falta de información o desconocimiento de cómo administrar y tratar las quemas en las tierras de usos agropecuarios.

La planificación para la protección contra los incendios y su manejo debe realizarse de manera integral y cooperativa por lo tanto urge a nivel nacional un documento que advierta el riesgo potencial ante incendios de nuestro país. Este debe estar fundamentado en mapas que muestren espacialmente la distribución de la problemática.

Se debe elaborar mapas con recursos humanos, zonas forestales, actualización de las vías de comunicación terrestre, estas últimas con el fin de conocer las diferentes rutas de acceso en caso de detección de un foco de incendio.

En el país las especies la flora amenazada son resilientes pero el lapso esperado para ello supera el cuarto de siglo, situación que vuelve altamente frágil la permanencia de los ecosistemas.

El modelo utilizado presenta buenos resultados ya que existe una relación directa de incendios con las diferentes categorías de riesgo establecidas.

Se recomienda su uso siempre y cuando exista la información disponible para poder modelar los datos según lo establecido en la metodología.

Las técnicas de teledetección constituye una herramienta poderosa y confiable para llevar a cabo procesos de validación y contextualizar el desempeño del modelaje de los datos, además facilita el monitoreo de los espacio protegidos.

La correspondencia entre las áreas incineradas y el riesgo de incendio asociado permitirá profundizar el estudio de esta herramienta para su puesta en funcionamiento de manera operativa dentro de un SIG.

La problemática de los incendios forestales debe abordarse desde la prevención, enfatizando en la motivación de los pobladores y su actitud negligente y/o irresponsable con los recursos naturales y por ende con el ambiente.

La sinergia de actores debe orientar esfuerzos en educación para el conocimiento de los recursos naturales y cómo protegerlos, además de incluir campañas de difusión que incentiven a la utilización de prácticas alternativas a las quemadas para la eliminación de desechos vegetales.

Esta investigación constituye un insumo básico para orientar prácticas en materia de prevención de manera que se busque garantizar la estabilidad biogeográfica del país.

## REFERENCIAS

- Alpizar, E., Bolaños, R., Bravo, J., Canessa, G. & J. Echeverría (1998) Plan de Acción para la Cuenca del Río Tempisque. Zonas de Vida, Biodiversidad, Áreas Protegidas y Humedales. Volumen II. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.
- Bosque Sendra Joaquín, Díaz Castillo Concepción & Díaz Muñoz María Ángeles. (2002). De la justicia espacial a la justicia ambiental en la política de localización de instalaciones para la gestión de residuos en la comunidad de Madrid. Departamento de Geografía, Universidad de Alcalá. Recuperado de <http://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo2/archivos/jusespam.pdf>
- Castillo Miguel, Pedrera Patricio, Eduardo Peña (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. Revista Ambiente y Desarrollo de CIPMA. VOL. XIX / N°s 3 y 4 / 2003. Recuperado de [http://www.cipma.cl/RAD/2003/3-4\\_Castillo.pdf](http://www.cipma.cl/RAD/2003/3-4_Castillo.pdf)
- Echeverría, A., Echeverría, J. & A. Mata (1998) Plan de Acción para la Cuenca del Río Tempisque. Antecedentes del Estudio y Resumen Ejecutivo. Centro Científico Tropical, San José, Costa Rica.
- Galdames Ortiz Domingo Vicente (2000). Desarrollo de un marco conceptual para proponer un sistema de gestión ambiental municipal en la Comuna de Melipilla. Universidad de Santiago de Chile. Recuperado de <http://www.fortunecity.es/expertos/creativo/129/>
- Gómez Delgado Montserrat & Barredo Cano José Ignacio, (2004). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Editorial RAMA, Madrid, España.
- Ferreras, J. Estada. P. Herrero T. & Martín M.A. (2001). Los incendios forestales. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente. Recuperado de <http://www.revistaecosistemas.net/articulo.asp?Id=379>
- Lizano, O.G. (1998) "Dinámica de las aguas en la parte interna del Golfo de Nicoya ante altas descargas del Río Tempisque." Revista de Biología Tropical, vol. 46. Supl. 6: 11-20.
- Loaiza N. Vanessa. La Nación, (24 /01/ 2008). Incendios forestales provocados arrasaron 32.000 hectáreas. San José, Costa Rica. Recuperado de [http://www.nacion.com/ln\\_ee/2008/enero/24/pais1396413.html](http://www.nacion.com/ln_ee/2008/enero/24/pais1396413.html)
- Mascaraque Sillero Álvaro (2003). Índices de causalidad y riesgo de incendios aplicados a los espacios naturales protegidos de la comunidad de Madrid. Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de [http://oa.upm.es/911/1/PFC\\_Riesgos\\_Incendios\\_Forestales.pdf](http://oa.upm.es/911/1/PFC_Riesgos_Incendios_Forestales.pdf)
- Maskrey Andrew (1993). Los desastres no son naturales. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina. Colombia.
- Mateo Vega Javier, (2001). Características generales de la cuenca del Río Tempisque, p. 32-72. En: Jiménez, J.A. y E. González (editores). La cuenca del río Tempisque. Perspectivas para un manejo integrado. Organización para Estudios Tropicales, San José, Costa Rica.
- Ordoñez Celestino & Martínez Alegría Roberto. (2003) Sistemas de Información Geográfica. Aplicaciones prácticas con Idrisi32 al análisis de los riesgos naturales y problemas medioambientales. Editorial ALFA OMEGA. México.
- R. Viqueira José R., Álvarez Pedro, Varela José & Saco Pedro J.(2003). Architecture of a Natural Disasters Management Framework and its Application to Risk Assessment. Instituto de Investigaciones Tecnológicas. University of Santiago de Compostela, y el Centro Politécnico Superior. University of Zaragoza. España. Recuperado de [http://plone.itc.nl/agile\\_old/Conference/estoril/papers/65\\_Jose%20Viqueira.pdf](http://plone.itc.nl/agile_old/Conference/estoril/papers/65_Jose%20Viqueira.pdf)
- Ramos Rodríguez Marcos Pedro, González Menzonet Yudisnelvis. (2003) Definición de la época de incendios forestales en un contexto multivariado. Recuperado de <http://www.floresta.ufpr.br/firelab/artigos/artigo354.pdf>
- Sistema Nacional de Áreas de Conservación del Ministerio de Ambiente y Energía (2006). Estrategia Nacional de Manejo del Fuego de Costa Rica: 2006 - 2010. Tercera edición, San José, Costa Rica. Recuperado de [http://documentacion.sirefor.go.cr/archivo/incendios/emf\\_2006.pdf](http://documentacion.sirefor.go.cr/archivo/incendios/emf_2006.pdf)
- Villalobos Flores Roberto, Retana José A., & Acuña Anselmo. (2000) El Niño y los Incendios Forestales en Costa Rica. Instituto Meteorológico Nacional. Gestión de Desarrollo. Recuperado de [http://www.imn.ac.cr/publicaciones/estudios/Nino\\_incendios\\_forestales.pdf](http://www.imn.ac.cr/publicaciones/estudios/Nino_incendios_forestales.pdf)

# Análisis y simulación espacio temporal de la dinámica de las zonas agrícolas mediante Sistemas de Información Geográfica

Plata Rocha Wenseslao<sup>1</sup>, Corrales Barraza Gabriela<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio/Universidad Autónoma de Sinaloa  
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios Ciudad Universitaria Culiacán/Sinaloa/México  
wenses@uas.edu.mx

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio/Universidad Autónoma de Sinaloa  
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios Ciudad Universitaria Culiacán/Sinaloa/México  
ga5bi.corrales@gmail.com

## RESUMEN

En este trabajo se presenta un análisis y simulación espacio-temporal de la agricultura en el Valle de Culiacán, Sinaloa, México, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG). El estado de Sinaloa tiene el primer lugar en producción alimentaria del país, de hecho, la Ciudad capital, Culiacán, se asienta en uno de los valles agrícolas más prolíficos del territorio nacional, abarcando principalmente los municipios de Culiacán y Navolato. Las zonas agrícolas en estos municipios constituyen el 52.6% de la superficie, casi 450,000 hectáreas de cultivo, de las cuales, el 34.3% es agricultura de riego y el 18.3% restante es agricultura de temporal. Para llevar a cabo el estudio se utilizan los mapas de usos de suelo y vegetación de 1993 y 2011, y con base en estos se proponen 2 escenarios de simulación (tendencia y sostenibilidad) al 2030. El resultado obtenido muestra que la mayor dinámica se da en la agricultura de temporal y en la agricultura de riego. De esta manera se generó el escenario de tendencia, donde las transiciones más significativas se dan de selvas hacia la agricultura de temporal y hacia la agricultura de riego y humedad; y de ambas agriculturas a los asentamientos humanos. Mientras que en el escenario de sostenibilidad, la principal transición se presenta de agricultura de temporal hacia las selvas, seguida en menor cantidad, por la de agricultura de temporal a pastizales.

Dichos escenarios son de gran utilidad en la gestión, planeación y prospección del territorio, integrando una visión participativa y adaptativa a las ordenanzas gubernamentales sobre las proyecciones de futuro de la región.

Palabras clave: **SIG, escenarios futuros, evaluación multicriterio.**

## ABSTRACT

*This paper presents a spatial-temporal analysis and simulation of agriculture in the Culiacan Valley, Sinaloa, Mexico, using Geographic Information Systems (GIS). The state of Sinaloa has the first place in food production in the country, in fact, the capital city, Culiacán, is based in one of the most prolific agricultural valleys of the national territory, mainly covering the municipalities of Culiacan and Navolato. The agricultural areas in these municipalities constitute 52.6% of the area, almost 450,000 hectares of cultivation, of which 34.3% is irrigated agriculture and the remaining 18.3% is temporal agriculture.*

*In order to carry out the study, the maps of land use and vegetation of 1993 and 2011 are used, and based on these, are proposed two scenarios of simulation (trend and sustainability) by 2030. The results obtained shows that the greatest dynamics occurs in temporal agriculture and in irrigation agriculture. In this way, the trend scenario was generated, where the most significant transitions occur from rainforests to temporal agriculture and to irrigated agriculture and humidity; and from both agricultures to human settlements. While in the sustainability scenario, the main transition occurs from temporal agriculture to the rainforests, followed in less quantity, by the one of agriculture of temporary to grasslands. These scenarios are very useful in the management, planning and prospecting of the territory, integrating a participatory and adaptive vision to the governmental ordinances on the future projections of the region.*

**Keywords:** GIS, future scenarios, multicriteria evaluation.

## I. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas terrestres han sufrido grandes transformaciones principalmente debido a los cambios de cobertura y uso del suelo, los cuales, representan las consecuencias más claras de la intervención humana sobre el medio ambiente (Mustard, Defries, Fisher, Moran, & 2004, 2004). En este sentido, al análisis de los cambios, ayudan a explicar el alcance, la importancia y el efecto negativo que tiene dicha dinámica en el medio ambiente y su relación con las diversas actividades humanas, sobre todo las relacionadas con la antropización del territorio, la cual provoca la fragmentación y contaminación del paisaje, provocando daños irreversibles al medio ambiente y a la población.

De la misma forma, se señala en la literatura que no basta el monitoreo y análisis retrospectivo de los cambios de uso y cobertura de suelo, sino que es también necesario el análisis prospectivo a mediano y largo plazo (Henriquez, Azócar, & Romero, 2006; Mahesh Kumar & Garg Deepak, 2008). Una alternativa puede ser optar por la generación de diferentes escenarios de futuro, los cuales contribuyen, además, a tener un mejor entendimiento de los principales procesos de cambios de usos del suelo y ser utilizados como un sistema de alerta temprana que pone de manifiesto y subraya los efectos e impacto de los cambios futuros de usos del suelo que son prioritarios para un análisis en profundidad o de interés en la intervención política, económica, ambiental, social y cultural (Verburg, Kok, Pontius, & Veldkamp, 2006).

Al respecto, se puede decir que los modelos de simulación se presentan como un instrumento innovador, en los cuales es posible considerar las dinámicas actuales de la región y, a la vez, incluir la opinión consensuada de instituciones, ambientalistas, constructores, sociedad, investigadores, economistas, entre otros, permitiendo de este modo llevar a cabo un proceso de planificación del territorio más informado.

Dichos modelos ofrecen la posibilidad de integrar un conjunto de factores económicos, ambientales, sociales, entre otros, abarcando así los aspectos más representativos de las dinámicas territoriales.

Las posibilidades que se desprenden de lo anterior motivan que la aplicación de escenarios en planificación sea una línea o enfoque de actualidad científica, en el que se encuadran diversos proyectos de investigación en la materia, tanto de carácter nacional como internacional.

La aplicación de los escenarios para cuestiones medioambientales aparece a comienzos de la década de 1970 (Meadows, Meadows, Randers, & Behrens, 1972). Desde entonces los estudios de escenarios se han utilizado para analizar todo tipo de situaciones a distintas escalas, desde la sostenibilidad global hasta cuestiones ambientales muy específicas a escala regional. Los ejemplos más conocidos de estudios de

escenarios incluyen el Informe Especial sobre Escenarios de Emisiones del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2000), el Global Environment Outlook (PNUMA, 2002) y la Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (WRI, 2005). Estos estudios se han tomado como referencia por numerosas naciones y organizaciones mundiales, adaptando los escenarios a su escala de gestión.

Los objetivos de los estudios globales tienden a centrarse únicamente en producir escenarios, mientras que los estudios regionales, normalmente, se concentran en desarrollar herramientas que sirvan como apoyo en la toma de decisiones. Además, los escenarios globales tienden a responder cuánto uso del suelo cambiará, mientras que los escenarios regionales y locales tienden a responder también dónde tendrá lugar el cambio. Asimismo las simulaciones globales o continentales se llevan a cabo a largo plazo (normalmente tienen como horizonte futuro el año 2050 en adelante), mientras que los escenarios regionales y locales se realizan a corto plazo (la mayoría al 2020, 2030 o 2050).

Por su impacto en el ambiente, los escenarios asociados al cambio de uso de suelo y la evaluación de las políticas públicas han tomado relevancia en México desde la década de los 90. En las dos últimas décadas, se han realizado trabajos enfocados a establecer áreas de adecuación óptima para plantaciones agrícolas (Aguilar Rivera, Galindo Mendoza, Fortanelli Martínez, & Contreras Servin, 2010), para estudios de deforestación (Pineda Jaimes, 2010; Franco Prieto, 2010) y análisis de la desertificación (López Beltrán, Aguilar Villegas, & Plata Rocha, 2014; Pérez Verdín, Hernández Díaz, Márquez Linares, & Tecle, 2009).

En este sentido, en el presente trabajo se realiza un estudio de la dinámica histórica de las zonas agrícolas y la simulación de 2 escenarios de futuro, lo cual dará la pauta para analizar una línea evolutiva de tendencia y una situación de sostenibilidad en la agricultura en los Municipios de Culiacán y Navolato.

## II. ÁREA DE ESTUDIO

El Estado de Sinaloa tiene el primer lugar en producción alimentaria del País, de hecho, la Ciudad capital del Estado, Culiacán, se asienta en uno de los valles agrícolas más prolíficos del territorio nacional, abarcando principalmente los municipios de Culiacán y Navolato, los cuales se encuentran ubicados entre los paralelos 24° 02' y 25° 59' de latitud Norte y los meridianos 106° 52' y 108° 04' de longitud Oeste; con una altitud entre 0 y 800 m., colindando al Norte con los municipios de Angostura, Mocorito, Badiraguato y el Estado de Durango; al Este con el Estado de Durango y los municipios de Cosalá y Elota; al Sur con el Municipio de Elota y el Océano Pacífico (Figura 1).

El Municipio de Culiacán ocupa el 10.96% de la superficie del estado y cuenta con un total de 1,483 localidades (INEGI,

2010), mientras que al municipio de Navolato le corresponde un total de 3.71%, con 498 localidades. Ambos municipios ostentan un 14.67% del territorio estatal, con una superficie de 8,760.74 km<sup>2</sup>, en los cuales se distribuye un total de 994,241 habitantes (INEGI, 2010). El mayor porcentaje de habitantes radica en las ciudades capitales, Culiacán y Navolato, con 858, 638 y 135, 603 habitantes, respectivamente (INEGI, 2010).

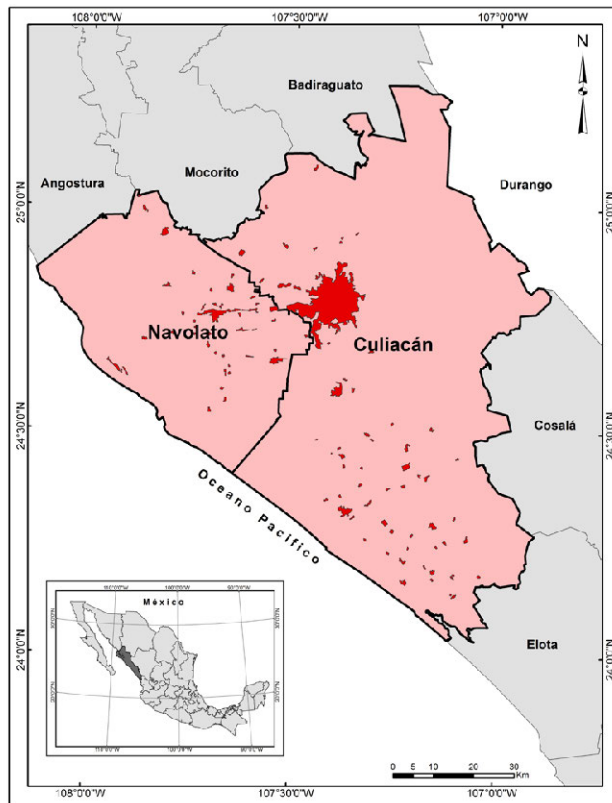


Figura 1. Municipios de Culiacán y Navolato

Las zonas agrícolas en estos municipios constituyen el 52.6% de la superficie, casi 450,000 hectáreas de cultivo, de las cuales, el 34.3% es agricultura de riego y el 18.3% restante es agricultura de temporal (Tabla 1).

Tabla 1 SUPERFICIE DE USOS DE SUELO EN AMBOS MUNICIPIOS

CATEGORÍA	SUPERFICIE (HAS) 1993	SUPERFICIE (HAS) 2011	% 2011
Agricultura de riego y humedad	283,812	293,782	34.3
Agricultura temporal	143,911	156,151	18.3
Asentamiento humano	6,650	20,116	2.4
Bosque	26,969	28,185	3.3
Otros tipos	164,152	158,948	18.6
Pastizales	340	3,020	0.4
Selvas	229,461	195,093	22.8
Σ	855,295	855,295	100.0

Otro aspecto fundamental a considerar es el hecho que ambas cabeceras municipales trazan un eje donde interactúan entes rurales, urbanos, industriales y comerciales, lo cual induce a la conformación de una zona metropolitana (Figura 3), lo que implica en corto plazo el desarrollo de planes territoriales en el corredor Culiacán - Navolato (Roldán López, 2006).



Figura 3. Zona metropolitana Culiacán - Navolato  
Fuente: <http://codesin.mx/wp-content/uploads/2015/01/Zona-Metropolitana-Culiacan-Navolato.pdf>

### III. MÉTODO

Para el estudio de la dinámica del territorio se utiliza como información de partida los mapas de usos del suelo del año 1993 y 2011, obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para lo cual se definió una leyenda conformada por 7 categorías, las cuales representan adecuadamente la dinámica entre los diferentes usos de suelo, obteniéndose así los mapas homogeneizados entre ambas fechas que permitieron realizar el estudio retrospectivo y la simulación de los escenarios de futuro (Figura 2).

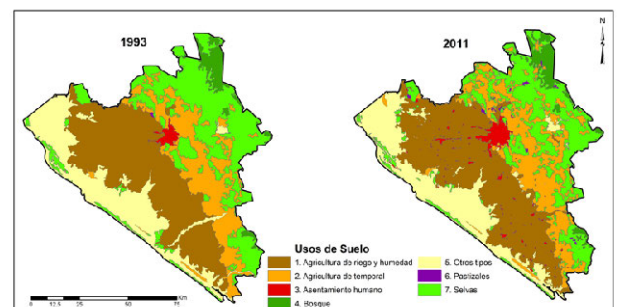


Figura 2. Mapas de usos de suelo del modelo

Una vez preparada la información cartográfica espacio-temporal se procedió a realizar el análisis detallado de los cambios de uso del suelo mediante la metodología desarrollada por Pontius (Pontius, Shusas, & McEachern, 2004), la cual permite obtener para cada categoría de uso del suelo las ganancias y las pérdidas, el cambio neto y los intercambios experimentados entre dos momentos temporales.

Luego de identificar los principales usos de suelo que intervienen en la dinámica territorial de los municipios de Culiacán y Navolato, se realiza la construcción de los escenarios para identificar las diferentes opciones que tuviese el área de estudio, si continuase la tendencia actual (escenario tendencial) o si se tuvieran intervenciones planificadas y concertadas en el corto, mediano y largo plazo (escenarios de sostenibilidad). Dicha metodología se realiza en 3 etapas (Figura 4).

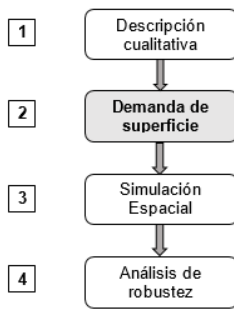


Figura 4. Etapas para la simulación de escenarios

Para llevar a cabo la primera etapa se realizaron reuniones con expertos del grupo de geomatica de la Universidad Autónoma de Sinaloa ([geomatica.uas.edu.mx](http://geomatica.uas.edu.mx)), en las cuales se consensó realizar un escenario de tendencia con la finalidad de mostrar cual sería el estado de los usos agrícolas hasta el año 2030 si se mantuvieran las lógicas ocurridas en el pasado, así como un escenario de sostenibilidad, en el cual se tomarían en cuenta los nuevos modelos de producción agrícola tecnificada y la reforestación de algunas zonas consumidas por la agricultura de temporal.

Para realizar la segunda etapa se optó por el diseño y ajuste de un modelo de Dinámica de Sistemas (DS) de Demanda, utilizando para ello el Software Vensim y los mapas de usos de suelo de 1993 y 2011 (Corrales, 2016).

Posteriormente, para la simulación geoespacial de los escenarios de zonas agrícolas se recopiló datos referentes al tipo de suelo, hidrografía, carreteras, altitud y pendiente (Tabla II), para diseñar los factores a utilizar en cada escenario.

**TABLA II**  
VARIABLES UTILIZADAS EN LA SIMULACIÓN DE LOS ESCENARIOS

VARIABLES	FUENTE/ESCALA
• Agricultura de riego y humedad • Agricultura de temporal • Asentamiento humano • Bosques • Pastizales • Selvas • Otros tipos.	Uso del Suelo y Vegetación INEGI Año 2011 1:250,000
• Altitud • Pendiente	MDT. INEGI Escala: 90m Año: 2013
• Tipos de suelo	INEGI 1:250,000
• Ríos • Canales	INEGI 1:250,00 1:1,000,00
• Carreteras	INEGI 1:50,000

Para obtener los mapas de aptitud o adecuación se utilizó la sumatoria lineal ponderada, la cual es uno de los métodos más utilizados en la Evaluación Multicriterio por su relativa sencillez, robustez y poca complejidad en su implementación (Gómez Delgado & Barredo, 2005). El nivel de adecuación de cada alternativa se obtiene sumando el resultado de multiplicar el valor de cada criterio por su peso [1]:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_i \cdot v_{ij} \quad (1)$$

Donde:  $w_i$  son los pesos;  $v_{ij}$  son los factores y  $r_i$  es la aptitud de cada píxel.

Finalmente, con los mapas de aptitud/adecuación obtenidos, se realizó una asignación multiobjetivo (MOLA, MultiObjective Land Allocation) en el software Idrisi entre los mapas de aptitud para agricultura de riego y aptitud para la agricultura de temporal.

El esquema metodológico seguido para realizar la investigación se muestra en la figura 4.

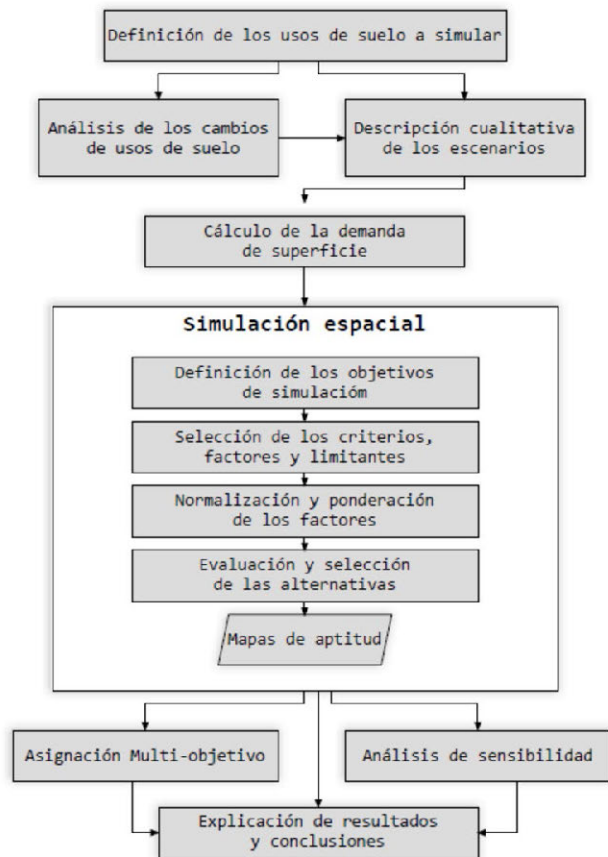


Figura 4. Esquema metodológico

#### IV. RESULTADOS

##### ANÁLISIS HISTÓRICO DE LOS CAMBIOS DE USO Y COBERTURA DE SUELO

Analizando la dinámica de los usos de suelo del año 1993 al 2011 se tuvo que la tendencia de los cambios fue de un aumento de los asentamientos humanos, de la agricultura de temporal, de la agricultura de riego y en menor medida de los pastizales y bosques. A su vez, las selvas tuvieron una gran pérdida de superficie y en menor cantidad la categoría de otros tipos.

Analizando ésta matriz de cambios, vemos como la transición de mayor tamaño se da de selvas a la agricultura de temporal, seguidas por las de la agricultura de temporal hacia agricultura de riego y otros tipos (Tabla 3).

**TABLA III**  
MATRIZ DE CAMBIOS: 1993 A 2011

	1	2	3	4	5	6	7
Agric. de riego y humedad	267,398	12,226	4	0	10,877	2	3,275
Agric. temporal	250	116,343	3	380	3,250	0	35,925
Asent. humano	9,462	2,687	6,641	0	209	0	1,117
Bosque	0	0	0	26,166	0	0	2,019
Otros tipos	5,926	2,313	0	0	146,326	0	4,383
Pastizal	146	432	0	231	0	337	1,874
Selva	630	9,910	2	192	3,490	1	180,868

Ahora bien, si analizamos la dinámica de los usos de suelo en función de sus ganancias, pérdidas, persistencias y cambios, tenemos que, la categoría que experimentó la mayor ganancia fue la agricultura de temporal, seguida por la agricultura de riego y humedad, y en cantidades menores los asentamientos humanos y otros tipos. En cuanto a las pérdidas, fueron las selvas la categoría que experimentó la mayor pérdida, de igual forma, son las selvas las que presentan los mayores cambios, seguidas por los asentamientos humanos y las agriculturas. Es importante recalcar que, el aumento de superficies de categorías como, las agriculturas y los asentamientos humanos, se da básicamente a costa de las selvas (Tabla 4). De igual forma, debemos considerar que las transiciones experimentadas por la categoría de otros tipos, no representa un cambio negativo, pues dichos cambios se dan en las subcategorías de "área sin vegetación aparente" y "vegetación halófila y gipsófila", mientras que la vegetación hidrófila y los cuerpos de agua permanecen constantes.

**TABLA 4**  
CAMBIOS OCURRIDOS DE 1993 AL 2011

CLASE	GANANCIA	PÉRDIDA	PERSISTENCIA	CAMBIO NETO	CAMBIO TOTAL
1	26,384	16,414	267,398	9,970	42,798
2	39,808	27,568	116,343	12,240	67,376
3	13,475	9	6,641	13,466	13,484
4	2,019	803	26,166	1,216	2,822
5	12,622	17,826	146,326	5,204	30,448
6	2,683	3	337	2,680	2,686
7	14,225	48,593	180,868	34,368	62,818
Σ	111,216	111,216	744,079	79,144	222,432

En función de los resultados obtenidos del análisis de los cambios de usos de suelo observamos que la agricultura de riego y de temporal son las que mantienen las mayores ganancias y están dentro de las que tienen más pérdidas, mismas que se presentan espacialmente de diferentes partes del territorio, mientras que la agricultura de riego refleja su dinámica en el valle, la agricultura de temporal lo representa en la zona serrana (Figura 5).

Dicha dinámica no garantiza que nuestro territorio soporte tal presión en el futuro cercano, es por ello, que se propuso evaluar dos escenarios territoriales futuros, uno que nos marque las pautas de tendencia, es decir, un escenario de tendencia, que permita evaluar nuestro territorio futuro si se dieran las mismas lógicas seguidas en el pasado. Dicho escenario sería la base para medir un escenario alternativo de sostenibilidad a mediano y largo plazo de las dinámicas de los usos de suelo en nuestro territorio.

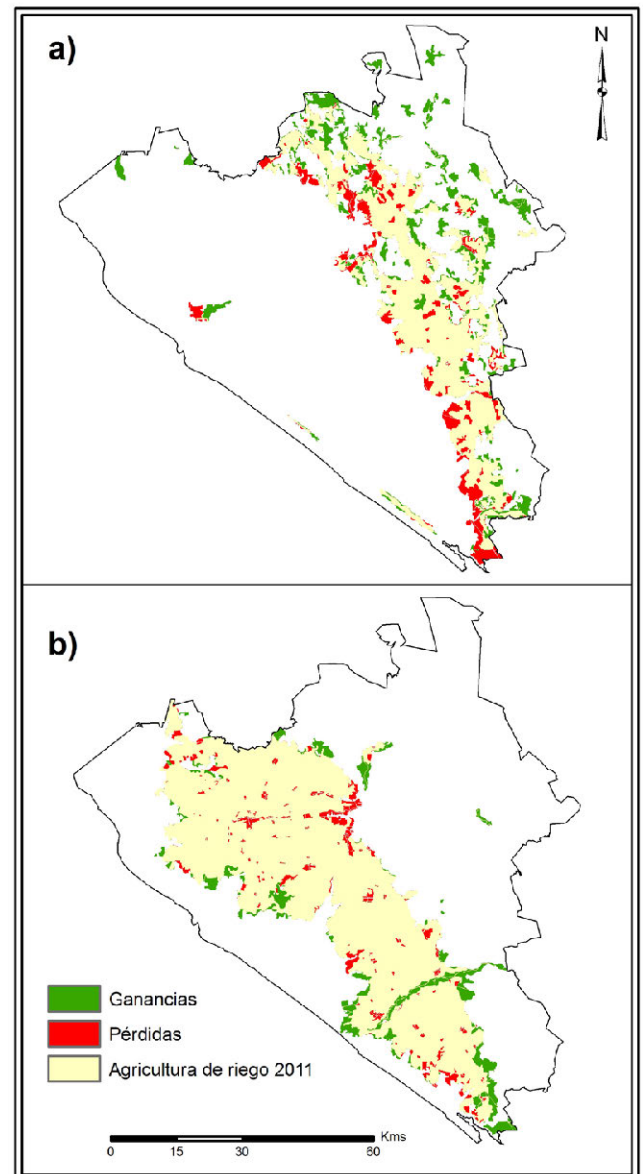


Figura 5. a) Agricultura de temporal, b) Agricultura de riego

**ESCENARIOS DE FUTURO**

*Descripción cualitativa*

De este modo se realizó la descripción cualitativa de los escenarios considerando el consenso de los integrantes del grupo de investigación en Geomática de la Universidad Autónoma de Sinaloa como se enuncian a continuación.

El seguimiento de las directrices de cambio ocurridas en el pasado, constituye la base del escenario de tendencia. Este escenario supone la confirmación y consolidación de las tasas de cambio ocurridas en el pasado, en donde, se establece un comportamiento de intercambio espacial de las zonas agrícolas, ya que mantendrán altas tasas de incremento y considerables pérdidas.

Por otro lado, la búsqueda de nuevos modelos y fórmulas que minimizan el impacto ambiental y maximizan el beneficio social y económico constituye la fortaleza del escenario de sostenibilidad. Las tasas de crecimiento de las superficies agrícola-

las disminuyen, debido a la innovación y tecnificación en las actividades agrícolas, lo que incrementaría la productividad en superficies menores de suelo. En particular, la agricultura de temporal disminuye debido al incremento de las selvas y pastizales. Lo que resulta en una disminución de las tasas de deforestación, así como recuperación de parte de la superficie de selvas deforestadas.

#### *Demanda de suelo agrícola*

Con el Modelo de Demanda ajustado, se obtuvo la superficie de futuro, ejecutándose con 19 iteraciones (años) para obtener la demanda de cada categoría del año 2011 al año 2030 para ambos escenarios futuros (Corrales Barraza, 2016).

En el caso del escenario de tendencia, solamente se ejecutó hacia adelante con 19 iteraciones y manteniendo las tasas obtenidas en el pasado, lo cual permitió obtener la demanda de cada uso de suelo, considerando un comportamiento igual al pasado.

A partir de los resultados de la superficie simulada, observamos que, efectivamente como ocurrió del año 1993 al 2011, todas las categorías continúan con la tendencia de aumentar de superficie, a excepción de las selvas, las cuales disminuyen considerablemente su superficie.

Para el escenario de sostenibilidad se ajustaron las tasas de transiciones de manera que se cumpla lo planteado en este escenario, es decir, que las tasas de superficie de cada categoría disminuyan o aumenten, conforme una dinámica sostenible de los usos de suelo. Al respecto, vemos una disminución de la superficie de agricultura de temporal debido al incremento de las selvas y pastizales, las superficies urbanas se mantienen constantes, con una tasa de crecimiento muy baja.

En la Tabla 5 se muestra la superficie obtenida para cada escenario y un indicador de su dinámica de cambio neto.

**TABLA 5**  
SUPERFICIES SIMULADAS

CATEGORÍA	SUPERFICIE REAL 2011	ESCENARIO DE TENDENCIA (ET) 2030	ESCENARIO SOSTENIBLE (ES) 2030
1	293,782	304,306.00	289,733.00
2	156,151	169,069.00	125,176.00
3	20,116	34,330.00	20,792.00
4	28,185	29,470.13	29,401.00
5	158,948	153,455.00	159,353.00
6	3,020	5,848.87	9,450.00
7	195,093	158,816.00	221,390.00
Σ	855,295	855,295	855,295.00

#### *Selección de los criterios, factores y restricciones para la simulación geoespacial*

Para la simulación geoespacial primero que nada se determinaron las zonas de restricción, es decir, se tomaron en cuenta las áreas donde cada objetivo a simular no se debía asignar, tales como: zonas urbanas, vías de comunicación, cuerpos de agua, red hidrográfica y algunos usos de suelo en particular (Figura 6).

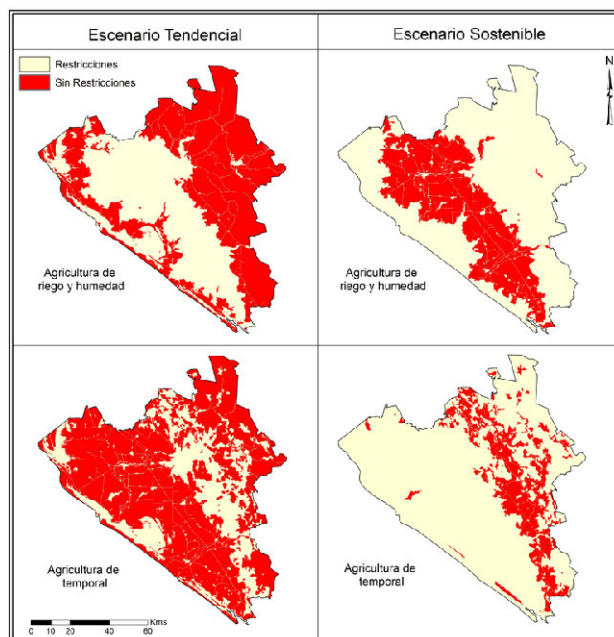


Figura 6. Mapa de restricciones, 1

#### *Normalización*

Como resultado de este apartado, tenemos los criterios normalizados, es decir, con una escala compatible, de todos los factores para cada uno de los escenarios.

La obtención de cada factor se obtuvo considerando diferentes procedimientos de normalización de cada uno de los factores para las categorías a simular en los dos escenarios planteados.

#### *Agricultura de Riego y humedad*

- Proximidad a Usos de suelo

Este criterio se utilizó solo para el escenario de sostenibilidad, en el cual se presentará una disminución de esta categoría. Considera los usos de suelo que producirán las pérdidas o disminución de superficie de la agricultura de riego. Es decir, las transiciones de agricultura de riego hacia otras categorías. Dichas transiciones, se obtuvieron en primer lugar, del análisis de los cambios sucedidos en el pasado, sin embargo, se analizó desde el punto de vista de la sostenibilidad que categorías deberían de crecer en función de la agricultura de riego y humedad y a que distancias se podrían producir esas transiciones. Se obtuvieron mapas de distancias de las categorías elegidas, y se normalizaron con funciones borrosas de tipo lineal decreciente, donde el valor máximo es el resultado del análisis mencionado, posteriormente se le asignó un peso a cada categoría y se realizó una sumatoria lineal ponderada, obteniéndose así, el mapa final que representa este criterio (Tabla 6).

**TABLA VI**  
PROXIMIDAD A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU IDONEIDAD PARA LA AGRICULTURA DE RIEGO

USYV	PESOS	DIST. DE NORMALIZACIÓN
Agricultura temporal	0.211	0 a 25,000
Asentamiento humano	0.031	0 a 4,000
Otros tipos	0.538	0 a 10,000
Selvas	0.220	0 a 10,000

- Proximidad inversa a Usos de suelo

Este criterio se utiliza para el escenario de tendencia y representa los usos de suelo sobre los que se debe de dar el



crecimiento de la agricultura de riego, sin embargo, aparte de representar los usos de suelo, también representa las distancias sobre cada uno de ellos. Estas, se consideran inversas pues van desde los límites de cada categoría hacia el interior, ya que la idea es representar las distancias hacia cada uso de suelo. Para la obtención de éste factor, se analizaron los usos sobre los que se dio el crecimiento de la agricultura de riego en el pasado, así como a que distancias. Posteriormente se le asignó un peso a cada categoría y se realizó una sumatoria lineal ponderada, obteniéndose así, el mapa final que representa este criterio (Tabla 7).

**TABLA VII**  
PROXIMIDAD INVERSA A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU IDONEIDAD PARA LA AGRICULTURA DE RIEGO

USYV	PESOS	DIST. DE NORMALIZACIÓN
Agricultura de temporal	0.46	0 a 5,000
Otros tipos	0.41	0 a 2,000
Selvas	0.13	0 a 2,500

- Proximidad a Agricultura de riego

Este factor da mayor nivel de aptitud a aquellas zonas más cercanas a la agricultura de riego. Se utilizó para la simulación de crecimiento de agricultura de riego y humedad en el escenario de tendencia. Se normalizó utilizando una función borrosa lineal decreciente, donde el valor mínimo que representa la máxima aptitud es 0, y máximo es 8,000.

- Proximidad inversa a Agricultura de riego

Este criterio se utilizó solo para el escenario sostenible, tiene como finalidad representar a que distancias de los límites de la agricultura de riego se producirá la disminución de superficie, asumiendo que se darán en los límites, donde esta colinda con otras categorías. Para generar este factor, primero se obtiene un mapa de distancias hacia el interior de la agricultura de riego y posteriormente se normaliza utilizando una función borrosa lineal decreciente, donde los valores van del 0 a 1,000.

- Proximidad a Canales

La accesibilidad a los canales se considera esencial para el desarrollo de la Agricultura de Riego. Así, los lugares más próximos a los canales se valoraron como los más óptimos para que se presente el aumento de la Agricultura de riego. Factor utilizado en el escenario de tendencia y normalizado con una función lineal decreciente.

- Lejanía a Canales

Este criterio utilizado en el escenario de sostenibilidad, considera los lugares más lejanos a los canales como los menos óptimos para la agricultura de riego, es decir, son los más óptimos para la pérdida de esta cobertura. Se normaliza usando una función Lineal creciente de 0 a 5,000.

- Proximidad a Ríos

Considera las zonas más cercanas a los ríos, como las más óptimas para que se presente el aumento de esta categoría, por lo que, este factor es utilizado para el escenario de tendencia. Se normaliza utilizando una función lineal decreciente.

- Lejanía a Ríos

Los lugares más lejanos a los ríos se valoraran como los más óptimos para la disminución de superficie de la agricultura de riego. Por lo que, éste factor es utilizado para simular pérdida de agricultura de riego en el escenario de sostenibilidad.

Para su normalización se utiliza una función borrosa lineal creciente.

- Pendiente

Este factor se normaliza de manera que se representen las mejores pendientes para el desarrollo de cada actividad, en este caso, para la agricultura de riego. La normalización se realizó, mediante una función sigmoïdal decreciente, donde el valor más óptimo es el 0 (punto de control c) y el valor de menor aptitud es el 16 (punto de control d).

- Altitud

En este factor se representa la altura más adecuada para el crecimiento de la Agricultura de Riego. Se obtuvieron los umbrales adecuados para el escenario de tendencia y para su normalización se utilizó una función de tipo borrosa sigmoïdal decreciente.

- Tipos de suelo ocupados

Este factor representa la aptitud de los distintos tipos de suelo para el desarrollo de la Agricultura de riego, dependiendo del escenario a simular. En el escenario de tendencia, que tiene como objetivo simular el aumento de superficie, se normaliza dando mayor aptitud a los tipos de suelos donde se debe desarrollar dicho aumento; para determinar los tipos de suelo, se realizó un análisis histórico que consistió en una superposición de los mapas de cambios de la agricultura de riego y el mapa de tipos de suelo, obteniendo así, los tipos de suelos en los que se ha dado el crecimiento, posteriormente, se establecieron pesos para cada uno, basándonos en la superficie ocupada por cada uno.

Una vez establecidos los pesos para cada tipo de suelo, se reclasificó cada uno con el valor del peso correspondiente y se normalizó utilizando una función lineal creciente, donde el valor mínimo es 0 y el valor máximo corresponde al valor del peso más alto (Tabla 8).

Para el escenario de sostenibilidad, que tiene el objetivo de simular la disminución de agricultura de riego, en primer lugar, se analizó sobre qué tipos de suelos se presentaba la agricultura de riego existente, la ponderación de cada suelo se realizó considerando la superficie de cada uno, en conjunto con los suelos que son menos óptimos para el desarrollo de la agricultura de riego. De la misma manera que en el escenario de tendencia, se normalizó utilizando una función lineal creciente de 0 al valor del peso más alto (Tabla 8).

**TABLA VIII**  
PESOS DE LOS TIPOS DE SUELO PARA LA AGRICULTURA DE RIEGO

TIPOS DE SUELO	PESOS E. TENDENCIAL	PESOS E. SOSTENIBLE
Cambisol	0.16	0.25
Feozem	0.08	0.05
Fluvisol	0.14	0.03
Solonchak	0.20	0.10
Vertisol	0.42	0.57

En resumen en la Tabla 9 se muestran los factores y los parámetros utilizados para su normalización.

**TABLA IX**  
VALORES UTILIZADOS PARA NORMALIZAR LOS FACTORES DE LA AGRICULTURA DE RIEGO Y HUMEDAD

FACTORES	FUNCIÓN	VALORES DE ADECUACIÓN			
		E. TENDENCIA		E. SOSTENIBLE	
		MIN	MAX	MIN	MAX
Proximidad a usos de suelo	Especial	-	-	SLP	SLP
Proximidad inversa a usos de suelo	Especial	SLP	SLP	-	-
Proximidad a Agricultura de riego	Lineal decreciente	0	8,000	-	-
Proximidad inversa a Agricultura de riego	Lineal decreciente	-	-	0	1,000
Proximidad a Canales	Lineal Decreciente	0	27,000	-	-
Lejanía a Canales	Lineal creciente	-	-	0	5,000
Pendiente	Sigmoidal decreciente	0	16	-	-
Altitud	Sigmoidal decreciente	0	130	-	-
Proximidad a Ríos	Lineal decreciente	0	30,000	-	-
Lejanía a Ríos	Lineal creciente	-	-	0	30,000
Tipos de Suelos	Lineal creciente	0	0.57	-	-
	Lineal decreciente	-	-	0	0.42

Finalmente, en la Figura 7 y 8 se muestran los mapas normalizados correspondientes a los factores para la simulación de la agricultura de riego en ambos escenarios.

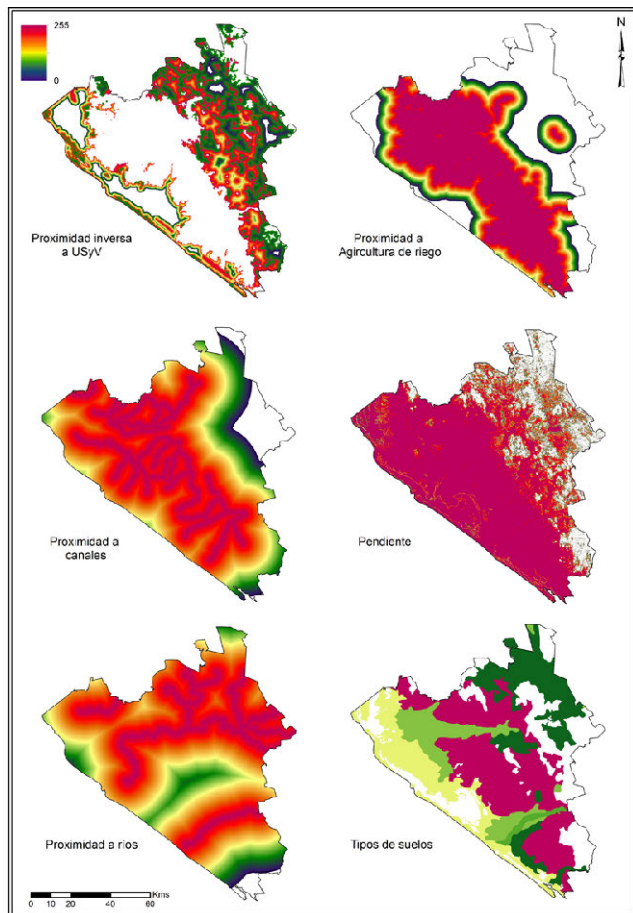


Figura 7. Factores finales para Agricultura de riego. Escenario de tendencia

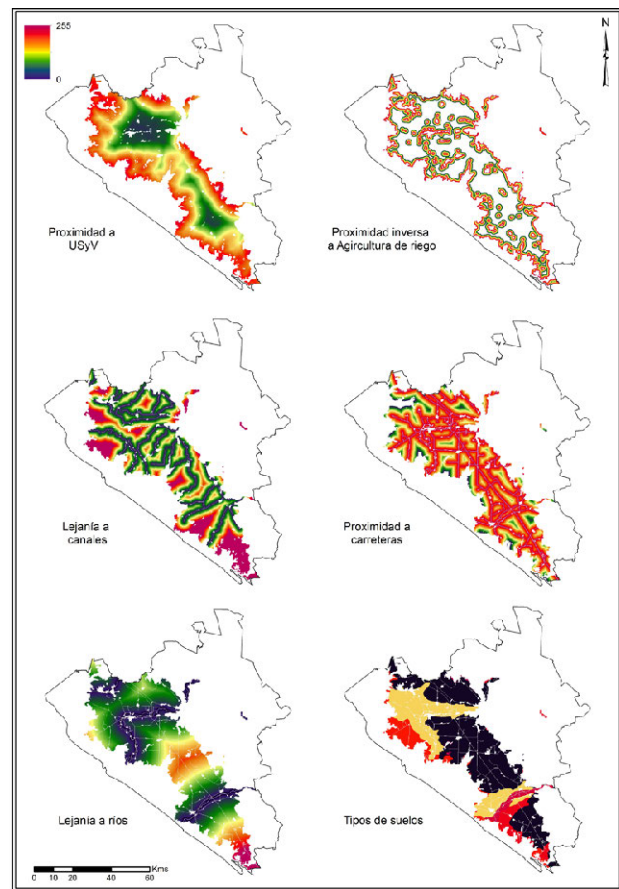


Figura 8. Factores finales para Agricultura de riego. Escenario de sostenibilidad

#### Agricultura de temporal

- Proximidad a Usos de suelo

Este criterio se realizó para el escenario sostenible, tomando en cuenta los usos de suelo que tienen que ver con las pérdidas de la agricultura de temporal. El procedimiento para obtenerlo, fue similar a este mismo factor para la agricultura de riego y humedad. A continuación, se presenta un resumen con las distancias utilizadas para la normalización, así como los pesos utilizados para la sumatoria lineal ponderada con que se obtuvo el criterio final (Tabla 10).

**TABLA X**  
PROXIMIDAD A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU IDONEIDAD PARA LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

FACTORES	PESOS	DIST. DE NORMALIZACIÓN
Agricultura de riego y humedad	0.188	0 a 15,000
Asentamiento humano	0.003	0 a 5,000
Otros tipos	0.093	0 a 13,000
Pastizales	0.009	0 a 15,000
Selvas	0.707	0 a 10,000

- Proximidad inversa a Usos de suelo

Este criterio es utilizado para el escenario de tendencia, representa los usos de suelo sobre los que se dará el crecimiento de la agricultura de temporal. Al igual que el anterior, se utiliza el mismo procedimiento que en el factor de la agricultura de riego, pero pensado ahora, para esta categorías. Resumiéndose a continuación las distancias utilizadas para la normalización, así como los pesos utilizados para la sumatoria lineal ponderada con que se obtuvo el criterio final (Tabla 11).

**TABLA XI**  
PROXIMIDAD INVERSA A USYV RECLASIFICADOS SEGÚN SU APTITUD PARA LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

FACTORES	PESOS	DIST. DE NORMALIZACIÓN
Agricultura de riego y humedad	0.01	0 a 1,100
Bosques	0.01	0 a 1,500
Otros tipos	0.08	0 a 6,000
Selvas	0.9	0 a 7,000

- Proximidad a Agricultura de temporal

Este factor da mayor nivel de aptitud a aquellas zonas más cercanas a la agricultura de temporal, es utilizado para la simulación de crecimiento de dicha categoría en el escenario de tendencia.

- Proximidad inversa a Agricultura de riego

Este criterio se utilizó solo para el escenario sostenible, tiene como finalidad representar a que distancias de los límites de la agricultura de temporal hacia el interior de ésta ocurrirán las pérdidas.

- Proximidad a Ríos

Considera las zonas más cercanas a los ríos, como las más óptimas para que se presente el aumento de esta categoría, por lo que, este factor es utilizado para el escenario de tendencia.

- Lejanía a Ríos

Los lugares más lejanos a los ríos se consideran como los de menor aptitud para que se dé la agricultura temporal, por lo que, en estos lugares, es más probable que se presenten las pérdidas. Este factor es utilizado para simular pérdida de agricultura de riego en el escenario de sostenibilidad.

- Pendiente

Este factor representa las mejores pendientes para cada actividad, en este caso, para la Agricultura de temporal, se utilizó en ambos escenarios, normalizándose de diferente manera para cada uno. Para el escenario de tendencia, se utilizaron los valores resultantes en cuanto a lo ocurrido en el pasado, mientras que para el sostenible, se utilizaron los valores más adecuados para que se realice esta actividad.

- Altitud

En este factor se representa la altura en la que se debe de dar la Agricultura de temporal. Se obtuvieron los umbrales adecuados para el escenario de tendencia, para su normalización se utilizó una función de tipo borrosa sigmoidal decreciente.

- Tipos de suelo ocupados

Este factor representa la aptitud de los distintos tipos de suelo para la simulación de la agricultura de temporal en ambos escenarios. Su normalización se llevó a cabo de la misma manera que éste factor en la agricultura de riego, pero considerando ahora a la agricultura de temporal. Para los dos escenarios se utilizó una función lineal creciente, donde el valor mínimo es 0 y el máximo es igual al valor del peso más alto (Tabla 12).

**TABLA XII**  
PESOS DE LOS TIPOS DE SUELO PARA LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

TIPOS DE SUELO	PESOS E. TENDENCIAL	PESOS E. SOSTENIBLE
Feozem	0.25	0.48
Litosol	0.03	0.05
Regosol	0.14	0.26
Solonchak	0.04	0.07
Vertisol	0.54	0.14

En la Tabla 13 se muestran todos los factores y los parámetros utilizados para su normalización.

**TABLA XIII**  
VALORES UTILIZADOS PARA LA NORMALIZACIÓN DE LOS FACTORES DE LA AGRICULTURA DE TEMPORAL

FACTORES	FUNCIÓN	VALORES DE ADECUACIÓN			
		E. TENDENCIA		E. SOSTENIBLE	
		MIN	MAX	MIN	MAX
Proximidad a usos de suelo	Especial	-	-	SLP	SLP
Proximidad inversa a usos de suelo	Especial	SLP	SLP	-	-
Proximidad a Agricultura de temporal	Lineal decreciente	0	20,000	-	-
Proximidad inversa a Agricultura de temporal	Lineal decreciente	-	-	0	2,000
Proximidad a Ríos	Lineal Decreciente	0	30,000	-	-
Lejanía a Ríos	Lineal creciente	-	-	0	35,000
Pendiente	Sigmoidal decreciente	0	60	0	15
Altitud	Sigmoidal decreciente	0	650	-	-
Tipos de Suelos	Lineal creciente	0	0.48	-	-
	Lineal decreciente	-	-	0	0.54

Finalmente en la Figura 9 y 10 se muestran los mapas normalizados correspondientes a los factores para la simulación de la agricultura de temporal en el escenario de tendencia y en el de sostenibilidad.

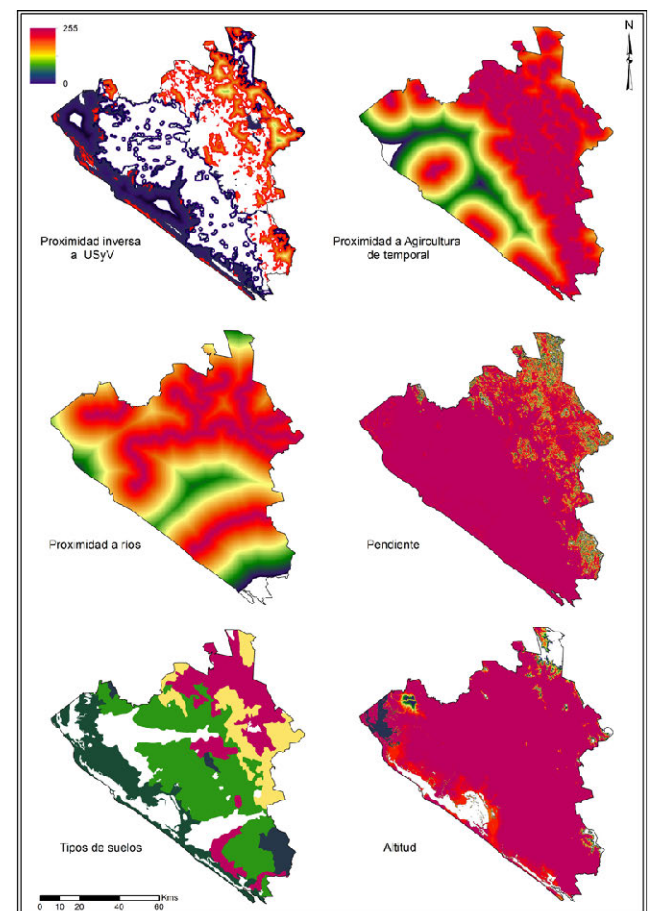


Figura 9. Factores para Agricultura de temporal. Escenario de tendencia

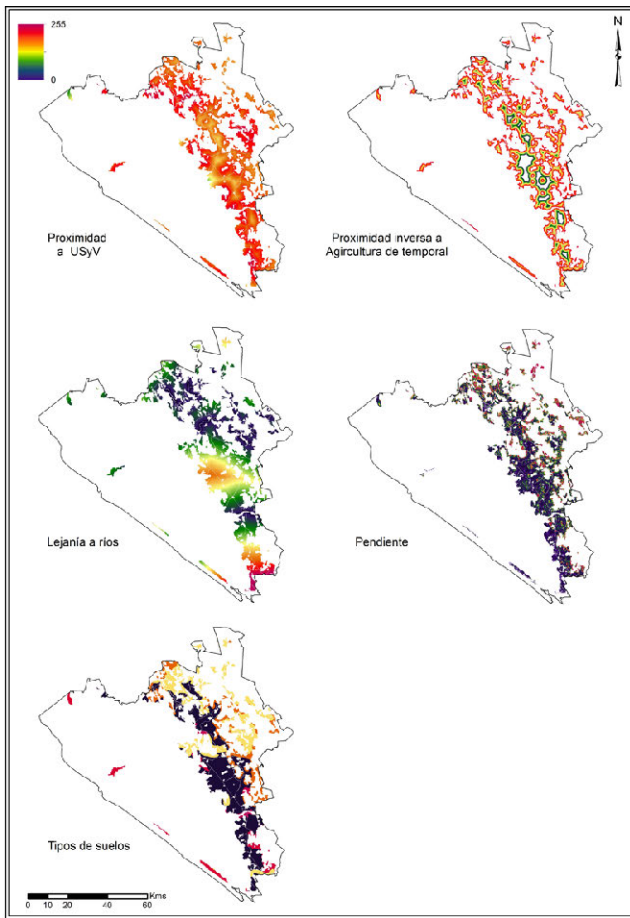


Figura 10. Factores para Agricultura de temporal. Escenario de sostenibilidad

*Ponderación de los factores utilizados para generar los mapas de aptitud para Agricultura de riego y humedad*

En la ponderación de los factores, se establecieron primero el orden jerárquico de cada uno de ellos. Finalmente siguiendo el procedimiento de jerarquías analíticas, se obtuvo el peso de cada factor. El resultado del peso para los factores muestra que se asignó el mayor peso a los usos de suelo, así como al uso de suelo que se estuviera simulando. En el caso de la simulación de la Agricultura de riego y humedad, vemos como los factores de mayor peso con la proximidad a USyV, y la proximidad a Agricultura de riego, ya sea normal o inversa, dependiente del escenario a simular (Tabla 14 y 15).

**TABLA XIV**  
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE RIEGO Y HUMEDAD EN EL ESCENARIO DE TENDENCIA

FACTORES	6	5	4	3	2	1	PESO
6) Tipos de suelo	1	---	---	---	---	---	0.05
5) Proximidad a Ríos	2	1	---	---	---	---	0.10
4) Pendiente	3	1.5	1	---	---	---	0.15
3) Proximidad a Canales	4	2	1.333	1	---	---	0.19
2) Proximidad a A. Riego	5	2.5	1.667	1.25	1	--	0.23
1) Proximidad inversa a USyV	6	3	2	1.5	1.2	1	0.28

**TABLA XV**  
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE RIEGO Y HUMEDAD EN EL ESCENARIO DE SOSTENIBILIDAD

FACTORES	6	5	4	3	2	1	PESO
6) Tipos de suelo	1	---	---	---	---	---	0.05
5) Lejanía a Ríos	2	1	---	---	---	---	0.07
4) Proximidad a Carreteras	3	1.5	1	---	---	---	0.15
3) Proximidad a Canales	4	2	1.33	1	---	---	0.10
2) Proximidad inversa a A. Riego	6	3	2	1.5	1	--	0.25
1) Proximidad a USyV	9	4.5	3	2.25	1.5	1	0.38

Diseñados los factores para cada escenario y definidos sus pesos, se obtuvieron, aplicando una sumatoria lineal ponderada, los mapas de aptitud para ambos escenarios. En la Figura 11, vemos el mapa de aptitud para la Agricultura de riego y humedad para el escenario de tendencia y para el escenario de sostenibilidad, donde podemos apreciar como cada mapa representa el objetivo de simulación planteado, dependiendo esto, de la finalidad de cada escenario.

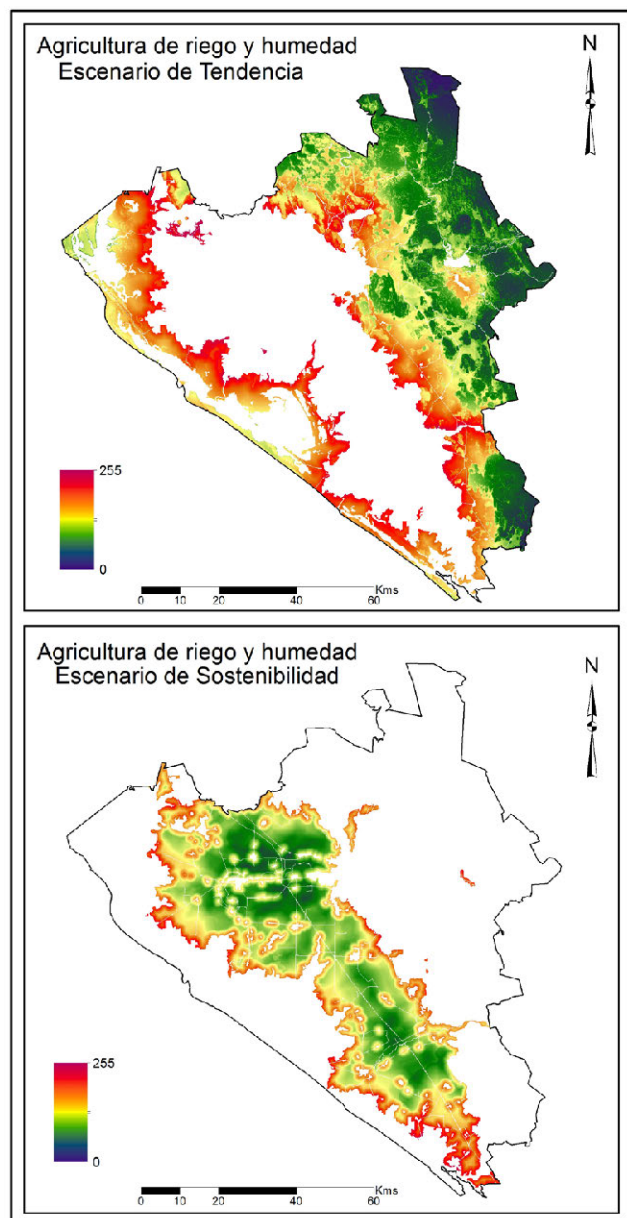


Figura 11. Mapas de aptitud para la agricultura de riego y humedad

Ponderación de los factores utilizados para generar los mapas de aptitud para Agricultura de temporal

La ponderación de los factores para la simulación de agricultura de temporal en ambos escenarios se muestra en la Tabla 16 y 17, donde podemos ver el orden jerárquico de cada uno de ellos, así como el peso resultante.

**TABLA XVI**  
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE TEMPORAL EN EL ESCENARIO DE TENDENCIA

FACTORES	6	5	4	3	2	1	PESO
6) Tipos de suelo	1	---	---	---	---	---	0.05
5) Altitud	2	1	---	---	---	---	0.07
4) Pendiente	3	31.5	1	---	---	---	0.12
3) Proximidad a Ríos	4	2	1.333	1	---	---	0.16
2) Proximidad a A. Temporal	6	3	2	1.5	1	---	0.25
1) Proximidad inversa USyV	8	4	2.667	2	1.333	1	0.35

**TABLA XVII**  
JERARQUÍA DE IMPORTANCIA DE LOS FACTORES Y PESOS RESULTANTES PARA AGRICULTURA DE TEMPORAL EN EL ESCENARIO DE SOSTENIBILIDAD

FACTORES	5	4	3	2	1	PESO
5) Tipos de suelo	1	---	---	---	---	0.07
4) Pendiente	2	1	---	---	---	0.08
3) Lejanía a Ríos	4	2	1	---	---	0.15
2) Proximidad inversa a A. Temporal	5	2.5	1.25	1	---	0.25
1) Proximidad a USyV	9	4.5	2.25	1.8	1	0.45

Con los pesos determinados y los factores en cada uno de los escenarios, se obtuvieron los mapas de aptitud para el escenario de tendencia y para el escenario de sostenibilidad (Figura 12).

A partir de dichos mapas se obtuvieron los píxeles con la mayor aptitud para la asignación de la agricultura de riego y de temporal para ambos escenarios. Para ello, se realizó una asignación multiobjetivo (MOLA), con la finalidad de resolver posibles conflictos entre los píxeles de mejor aptitud para agricultura de riego y de temporal, obteniendo un mapa con todos ambos objetivos para el escenario de tendencia y de sostenibilidad (Figura 13).

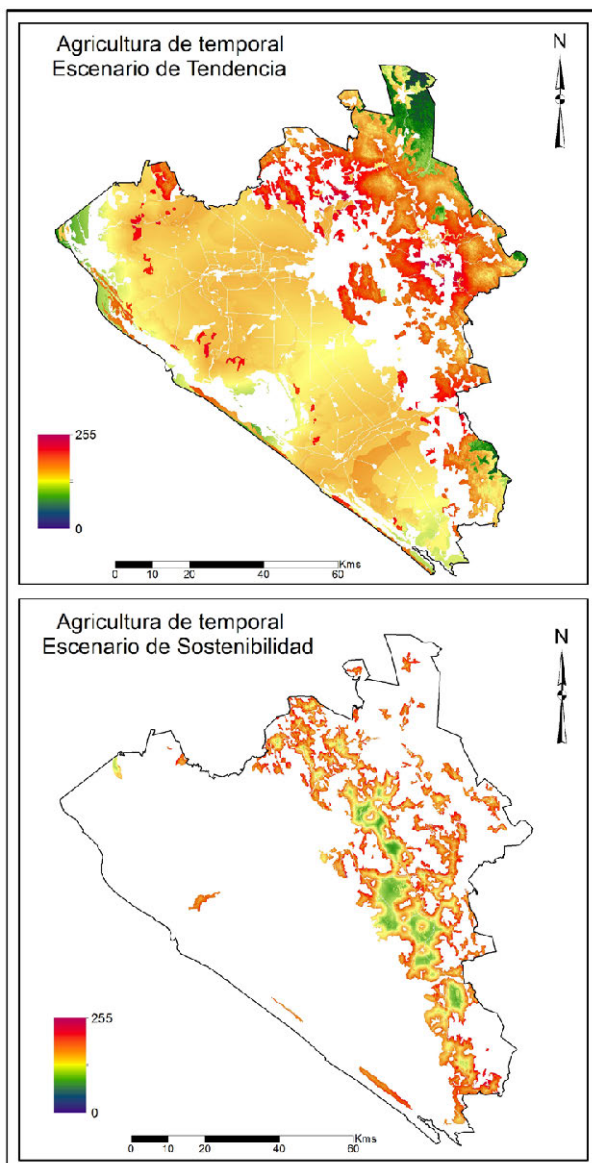


Figura 12. Mapas de aptitud para la agricultura de temporal

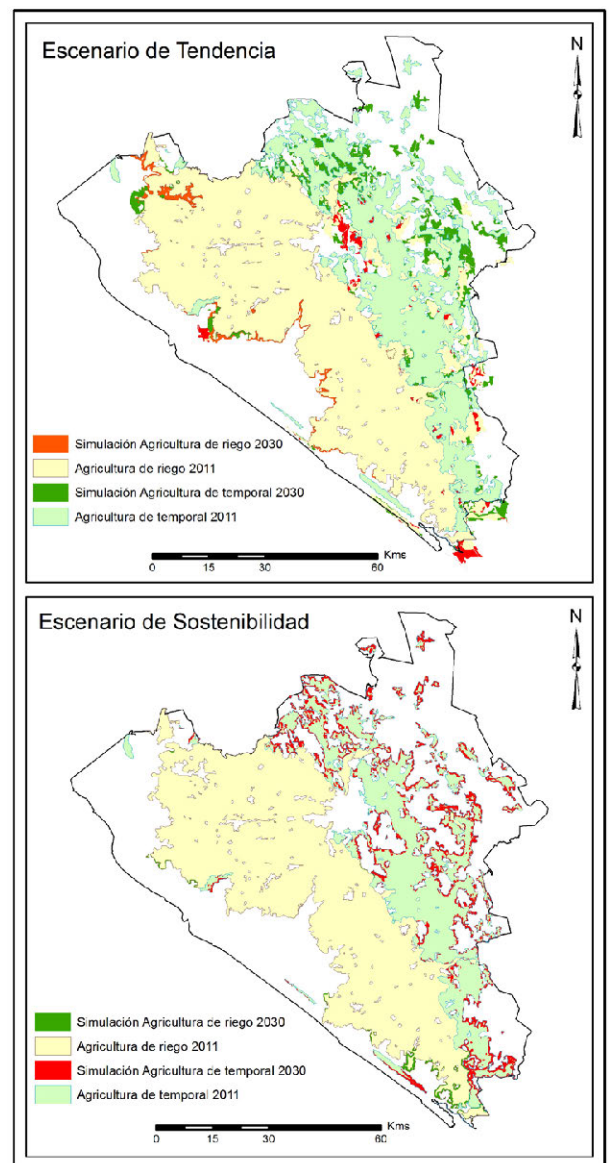


Figura 13. Escenario de Tendencia y Sostenibilidad para la agricultura de riego y humedad y la agricultura de temporal.

*Descripción de la evolución de los cambios en ambos escenarios*

La simulación espacial de cada escenario representa su descripción cualitativa, para el escenario de tendencia se observó una dinámica futura de los usos de suelo igual a la ocurrida en el pasado, mientras que, el escenario de sostenibilidad muestra un crecimiento con base en la protección de suelos forestales y una evolución de las zonas agrícolas sostenible en cuanto al consumo de suelo.

Analizando los indicadores de cambio del año 2011 a cada uno de los escenarios simulados, podemos ver que, en el escenario de tendencia, ambas agriculturas presentan unas ganancias altas, mientras las selvas sufren una enorme pérdida. Al contrario, en el escenario de sostenibilidad, la agricultura de temporal disminuye considerable en superficie a costa del aumento de las selvas (Tabla 18).

**TABLA XVIII**  
INDICADORES DE CAMBIOS DEL 2011 AL 2030 EN AMBOS ESCENARIOS

CATEGORÍA	AUMENTO		DISMINUCIÓN	
	ET	ES	ET	ES
Agricultura de riego y humedad	21,649	0	11,125	4,049
Agricultura temporal	16,285	0	3,746	30,975

En la Figura 45 y la Figura 46, podemos analizar espacialmente donde se efectuaron cada una de las transiciones. De esta manera, podemos ver como en el escenario de tendencia, las transiciones más significativas se dan de selvas hacia la agricultura de temporal y hacia la agricultura de riego y humedad; y de ambas agriculturas a los asentamientos humanos. En el escenario de sostenibilidad, la principal transición se presenta de agricultura de temporal hacia las selvas, seguida en menor cantidad, por la de agricultura de temporal a pastizales.

Un análisis visual de ambos escenarios, muestra como en el escenario de tendencia, los cambios se presentan de manera compacta en torno a la categoría correspondiente, como es el caso de las transiciones hacia asentamientos humanos. Por otro lado, el aumento de las selvas en el escenario de sostenibilidad, muestra patrones espaciales un poco más diseminados, que corresponden a los límites entre ésta y la agricultura de temporal (Figura 14 y 15).

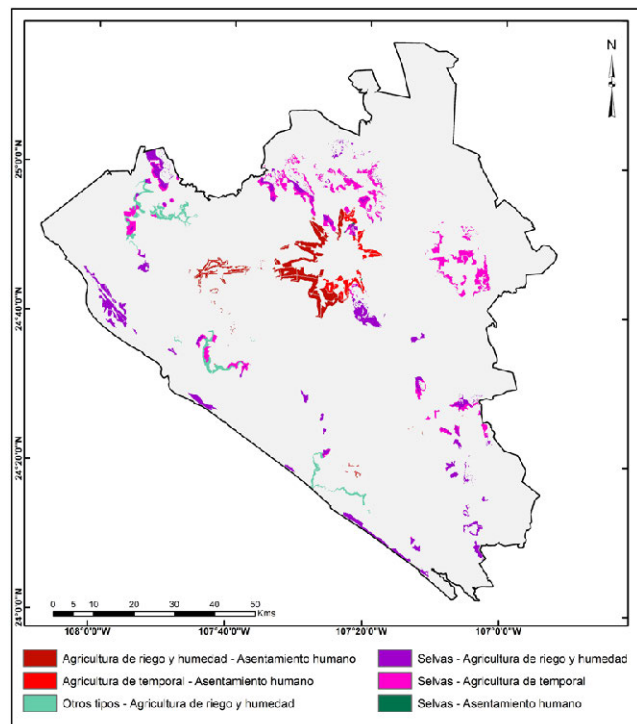


Figura 14. Mapa de cambios entre 2011 y 2030, escenario de tendencia

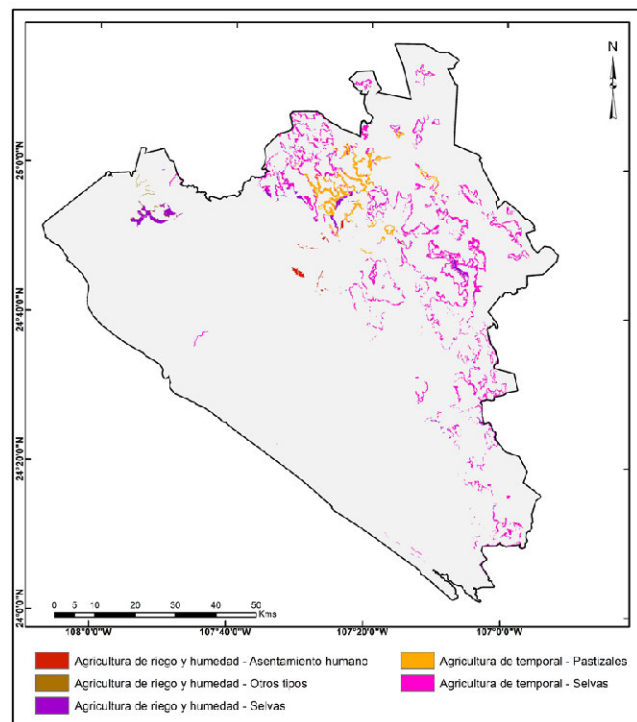


Figura 15. Mapa de cambios entre 2011 y 2030, escenario de Sostenibilidad

## V. CONCLUSIONES

Podemos concluir que en el presente estudio se han desarrollado y aplicado con éxito los modelos de simulación que nos permitieron obtener los dos escenarios planteados, utilizando algunos aspectos metodológicos novedosos y proponiendo un marco metodológico integral.

En primera instancia, de acuerdo con los resultados obtenidos respecto a los cambios de uso de suelo, se ha comprobado que en los municipios de Culiacán y Navolato se han presentado importantes cambios en el uso y ocupación del suelo en el periodo analizado. Observamos que el territorio tiene una tendencia a la pérdida de coberturas forestales, en particular de las selvas presentes en la región, y al incremento de las superficies artificiales; como los asentamientos humanos, la agricultura de temporal y la agricultura de riego.

Dicha dinámica no nos garantiza que nuestro territorio soporte tal presión en el futuro cercano, por ello, la necesidad de evaluar dos escenarios futuros, uno que nos marque las pautas de tendencia en dichas dinámicas de usos de suelo y uno alternativo, planteada en un desarrollo sostenible.

A pesar de la aparente sencillez de los módulos y programas informáticos utilizados, la simulación de los modelos requirió de un esfuerzo importante, sobre todo para definir los criterios y factores que deberían utilizarse para estructurar la base de datos geográfica, así como para normalizar cada uno de los factores, pues este es un paso determinante para obtener buenos resultados. La aplicación de una metodología combinada de técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica resultó ser muy práctica para sistematizar y agilizar procesos complejos que se dan en este tipo de modelos.

Se aplicaron algunos aspectos metodológicos novedosos en este campo, principalmente, en la modelización de los factores, como es el caso del factor de proximidad inversa a USyV. Otro aspecto relevante fue el uso de modelos normativos para implementar diferentes escenarios de futuro (tendencia y sostenibilidad). Dichos escenarios proporcionan información importante sobre los potenciales impactos ambientales, terri-

toriales y económicos que podrían ocasionar la continuación de las actuales políticas de planificación (escenario de tendencia) y/o alternativas de desarrollo más sostenibles (escenario de sostenibilidad).

También es relevante mencionar, el diseño y desarrollo de un modelo sencillo, pero robusto, que permitió la estimación de la demanda de usos de suelo, considerando solamente las transiciones entre estos usos, lo cual constituye una valiosa aportación. Pues se emplearon solamente dos mapas de usos de suelo de distintas fechas, a partir de los cuales, fue posible calcular la demanda que esos usos tendrían en una fecha futura. Es decir, a diferencia de otros modelos presentados en otros trabajos, no se han utilizado variables externas de tipo socioeconómico o demográfico, lo cual constituye un avance en la obtención de la demanda de suelo en escenarios de simulación de usos de suelo (Corrales Barraza, 2016).

De esta manera, el planteamiento metodológico seguido para la implementación de los escenarios es factible de ser utilizado para generar otras líneas evolutivas que podrían ser propuestas por los entes involucrados en la planificación del territorio. Además, la metodología planteada podría ser extrapolada a otros lugares y escenarios, pudiendo involucrar nuevas variables que permitirán enriquecer cada vez más los resultados obtenidos.

Finalmente, decir que los modelos y escenarios de futuro podrían servir para discutir exhaustivamente sobre los desequilibrios o beneficios que pueden ocasionar en el territorio si sigue una línea evolutiva u otra de las presentadas en los escenarios. Asimismo, estos escenarios de usos de suelo a futuro pueden convertirse en una herramienta útil para el diseño de la planificación territorial y en un instrumento para reparar posibles desequilibrios de los usos del suelo a nivel local y regional. Además, se presentan como algo novedoso, ya que no existe en la región otro tipo de análisis de esta índole, si bien en el Plan Director de Desarrollo Urbano de Culiacán se realiza la construcción de diferentes escenarios (Tendencial, Probable y Deseable), éstos se apegan solo a descripciones cualitativas de cada uno de ellos y están referidos solo al área urbana de la ciudad de Culiacán.

## REFERENCIAS

- Aguilar Rivera, N., Galindo Mendoza, G., Fortanelli Martínez, J., & Contreras Servin, C. (2010). Evaluación multicriterio y aptitud agroclimática del cultivo de caña de azúcar en la región de Huasteca (México). *Revista Corpoica - Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 144-154.
- Corrales Barraza, G. (2016). Simulación de Escenarios de Uso y Cobertura de suelo, mediante Técnicas de Evaluación Multicriterio y Sistemas de Información Geográfica. Caso de estudio: Culiacán y Navolato. (Tesis de maestría): Universidad Autónoma de Sinaloa, Sinaloa, México.
- Cuevas García, G., & Mas Causel, J. (2008). Aplicación de un modelo espacial para la elaboración de escenarios de uso/ cobertura del suelo en la Huacana, Michoacán. México, D.F. México, D.F.
- Franco Prieto, C. (2010). Desarrollo de un modelo basado en Análisis Espacial Multicriterio para la determinación de unidades de Ordenación Forestal. Caso Departamento del Casanare. Bogotá D.C., Colombia.
- Gómez Delgado, M., & Barredo, J. (2005). Sistemas de Información Geografía y Evaluación Multicriterio aplicados al Ordenamiento del Territorio. Madrid: Ra-Ma.
- Henríquez, C., Azócar, G., & Romero, H. (2006). Monitoring and modelling the urban growth of two mid-sized Chilean cities. *Habitat International* N° 30., 945-964.
- Ibarra Montoya, J., Román, R., Gutiérrez, K., Gaxiola, J., Arias, V., & Bautista, M. (2012). "Cambio en la cobertura y uso de suelo en el norte de Jalisco, México: Un análisis del futuro, en un contexto de cambio climático".
- INEGI. (2010). Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/>
- IPCC. (2000). Special Report on Emissions Scenarios: A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK.: Nebojsa Nakicenovic and Rob Swart (Eds) .

- López Beltrán, M., Aguilar Villegas, J., & Plata Rocha, W. (2014). Integración de imágenes del sensor MODIS y cartografía temática para la simulación de modelos geoespaciales para obtener zonas propensas a desertificación en el Estado de Sinaloa, México. Culiacán, Sinaloa, México.
- Mahesh Kumar, J., & Garg Deepak, K. (2008). Monitoring and modelling of urban sprawl using remote sensing and GIS techniques. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, N° 10, 26-43.
- Mas, J.-F., & Sandoval, A. F. (2011). Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTrópico*.
- Meadows, D., Meadows, D., Randers, J., & Behrens, W. (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. New York: Universe Books Publishers.
- Mustard, J., Defries, R., Fisher, T., Moran, E., & 2004. (2004). "Land-Use and Land-Cover Change Pathways and Impacts". Springer.
- Pérez Verdín, G., Hernández Díaz, J., Márquez Linares, M., & Teclé, A. (2009). Aplicación de técnicas multicriterio en el manejo integral forestal en Durango, México. *Madera y Bosques*.
- Pineda Jaimes, N. (2010). Descripción, análisis y simulación de procesos forestales en el Estado de México mediante Tecnologías de la Información Geográfica. Alcalá de Henares, Madrid: (Tesis de Doctorado).
- Pontius, R., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 101(2-3), 251-268.
- Roldán López, H. (2006). *La Urbanización Metropolitana de Culiacán*. Culiacán, Sinaloa, México: Gobierno de Sinaloa: Fontamara.
- Verborg, P., Kok, K., Pontius, R., & Veldkamp, A. (2006). Modeling land-use and land-cover change. En E. L. Geist (Ed.), *Land-use and land-cover change. Local processes and Global Impacts*. (págs. 117-135). Berlin: Springer.
- Von Thaden Ugalde, Clark Tapia Ricardo, & Venegas Barrera, C. (2012). Cambio de uso de suelo y cobertura vegetal en el Municipio de Guelatao de Juárez, Oaxaca, México. Oaxaca, México.
- WRI, W. (2005). Millennium Ecosystem Assessment. En *Ecosystems and Human Well-Being: Wetlands and Water Synthesis* (pág. 68). Washington, DC.



# Análisis geográfico para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia de residuos agropecuarios en la provincia de Manabí, Ecuador

Freire Sandy<sup>1</sup>, Villamar Cristina Alejandra<sup>\*1</sup>, Zapata Ríos Xavier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental/Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental/ Escuela Politécnica Nacional  
Ladrón de Guevara E11-253 /Pichincha/Ecuador  
sandy.freire@epn.edu.ec /  
cristina.villamar@epn.edu.ec\* /  
xavier.zapata@epn.edu.ec

## RESUMEN

En el Ecuador, potencialmente se generan alrededor de 140 mil ton/día de residuos pecuarios (porcinos y bovinos) y alrededor de 8,9 ton/ha de cultivos de transición (maíz y arroz). La generación de residuos agropecuarios trae consigo problemas ambientales, sociales y económicos, por lo que su gestión es prioritaria. La co-digestión anaerobia, es una alternativa tecnológica viable porque a partir de los residuos agropecuarios potencia el valor energético (biogás) y agronómico (residuos estabilizados). En el sector rural, la sostenibilidad de las tecnologías de tratamiento de residuos (re-valorización), depende de la disponibilidad permanente de éstos, condición que puede lograrse con plantas centralizadas. El objetivo de este estudio, fue analizar geográficamente la generación de residuos agropecuarios sobre un espacio geográfico definido por ser altamente productivo a nivel productor agropecuario y necesarios para la implantación teórica de plantas de co-digestión anaerobia para residuos agropecuarios locales, mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y considerando criterios de sustentabilidad. La metodología se basó en el uso de bases de datos agropecuarios y mapas temáticos de la provincia de Manabí, definida previamente como la zona geográfica con mayor potencial de generación de este tipo de residuos en el Ecuador. La información cartográfica y censal utilizó Procesos de Jerarquía Analítica (PJA) para dar peso a ciertas restricciones y álgebra de mapas para establecer restricciones físicas, ambientales, sociales y económicas que permitan delimitar las zonas sustentablemente adecuadas para estos fines. Los resultados obtenidos, permitieron establecer áreas delimitadas en la zona geográfica de estudio, con mayor (> 50 ton Sólidos Volátiles o SV) a menor (< 10 ton SV) potencial energético y agronómico. En conclusión, los modelos geográficos basados en SIG permiten establecer zonas apropiadas para la gestión y planificación en el tratamiento y re-valorización de residuos agropecuarios, es decir es una herramienta eficaz en la toma de decisiones a nivel territorial.

Palabras clave: **co-digestión anaerobia, estiércol animal, residuos de cultivos, análisis GIS.**

## ABSTRACT

*In Ecuador are potentially generated approximately 140,000 ton/day of livestock waste (pigs and cattle) and about 8.9 tonnes / ha of transitional crops (maize and rice). The generation of agricultural waste cause environmental, social and economic problems,*

therefore its management is a priority. Anaerobic co-digestion from agricultural wastes is a viable technological alternative because it increases its energetic value (biogas) and agronomic properties (stabilized waste). In the rural sector, the waste treatment technologies sustainability depends on the permanent availability of these wastes, condition that can be achieved with centralized plants. The objective of this study was to analyze geographically the wastes agriculture generation on a highly productive geographical space at the agricultural level by this productivity activity, in where will theoretically implant anaerobic co-digestion plants using Geographic Information Systems (GIS) and considering sustainability criteria (social, economic and environmental). The methodology was based on the use of agricultural databases and thematic maps of the Manabí province, which has the highest agricultural potential of this type of waste generation in Ecuador. The cartographic and census information used the Analytical Hierarchy Process (AHP) to give weight to certain constraints and maps algebra to establish physical, environmental, social and economic constraints that allow the sustainable delimitation of areas. The results obtained allowed to establish areas delimited within the study area, with greater (> 50 ton Volatile Solids or VS) to smaller (<10 ton VS) energetic and agronomic potential. In conclusion, geographical models based on GIS allow the delimitation of appropriate zones for the management and planning in the treatment and re-valorization of agricultural residues, that is to say it is an effective tool for decision making at territorial level.

**Keywords:** Anaerobic co-digestion, animal manure, crop residues, GIS analysis.

## I. INTRODUCCIÓN

A nivel mundial, gracias a la revolución verde (agricultura) y la ganadera (pecuaria) ha crecido la producción y consumo de cereales y carne en los últimos 30 años (FAO, 1996). Actualmente, países en vías de desarrollo y emergentes (América Sur y Central y Asia), son los principales productores de estos insumos (FAO, 2016). Asia, lidera en producción de carne de ganado primario con casi 125 millones de toneladas de carne en el año 2010 y en producción de arroz con 667 millones de toneladas en el año 2014 (FAOSTAT, 2016). A nivel nacional, la actividad agropecuaria es uno de los ejes primordiales para la economía del Ecuador, pues su participación al PIB (Producto Interno Bruto) Nacional oscila entre el 8 al 9% (Monteros et al., 2015). De acuerdo a la última Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua, para los rubros porcino y bovino existen alrededor de 4,12 y 1,64 millones de cabezas de ganado, respectivamente. Mientras, el rendimiento de producción de cultivos transitorios se encuentran en 4,41 y 4,47 ton/ha de arroz y maíz duro seco, respectivamente. Manabí, es una de las provincias con mayor producción agropecuaria, pues genera alrededor de 392 mil ton de cultivos transitorios (arroz y maíz duro seco) y alrededor de 894 mil cabezas de ganado vacuno al año (ESPAC-INEC, 2015).

Dentro de la actividad agropecuaria, la generación de residuos (excretas animales y restos vegetales) puede traer problemas ambientales, sociales y económicos por lo que su gestión es prioritaria (Menzi et al., 2010). Desde el punto de vista ambiental, el uso de excretas animales sin tratamiento en la agricultura, puede causar cambios en las características agronómicas del suelo, toxicidad por la presencia de metales y antibióticos y lixiviación de nutrientes a aguas subterráneas (Herrero y Gil, 2008). Algunos estudios, reportan además que el estiércol aplicado en grandes cantidades como fertilizante en climas áridos y semiáridos conduce a la salinización del suelo debido al alto contenido de cloruro de potasio y sodio (KCl, NaCl) (FAO, 1996). En el agua y por efecto de descarga directa o escorrentía de residuos agropecuarios, existen riesgos de contaminación orgánica, microbiológica y eutrofización (FAO, 1996). El almacenamiento de residuos agropecuarios, es fuente de emisiones a la atmósfera tales como gases de efecto invernadero (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>) y olores (NH<sub>3</sub>, COV, etc) (Hristov et al., 2013; Jongbloed y Lenis, 1998). En adición a los daños ecológicos, a escala socio-económica los residuos agropecuarios no tratados pue-

den incidir en la salud pública, molestias, pérdida de calidad de vida y un incremento en costos económicos por reparación ambiental (Osterberg y Wallinga, 2004; Sims y Wolf, 1994).

El tratamiento de los residuos agropecuarios, surge como la herramienta de mitigación y gestión más eficaz dentro del rubro. El componente orgánico, medido como Sólidos Volátiles (SV) y que para residuos pecuarios está entre 48 a 64 kg SV/ton y residuos agrícolas entre 731 a 873 kg SV/ton, favorece el uso de tecnologías de tratamiento biológico (Angelidaki y Ellegaard, 2003). La digestión anaerobia es el proceso de conversión microbiana de la materia orgánica en ausencia de oxígeno para la obtención de biogás (Lettinga, 1995; Flores, 2014). Los principales sub-productos del proceso microbiológico son biogás constituido en casi un 70% por metano, el cual posee valor energético y un residuo tratado-estabilizado con propiedades agronómicas (Ward et al., 2008; Flores, 2014). Los últimos estudios en este ámbito, apuntan a la optimización en la producción del biogás a partir de la mezcla de sustratos orgánicos (Álvarez y Lidén, 2008; Li et al., 2009). La co-digestión anaerobia es el proceso de digestión simultánea de dos o más sustratos para mejorar la producción de biogás, pues las características de los sustratos se complementan de manera que se equilibra la cantidad de nutrientes (Álvarez y Lidén 2008). Durante este proceso, el uso de estiércol animal que es rico en proteínas, otorga una fuente abundante de nutrientes, agua y alcalinidad a la mezcla (Angelidaki y Ellegaard, 2003). Mientras, los residuos vegetales ricos en carbohidratos y otros compuestos carbonáceos como la lignina y celulosa, incorporan una fuente de carbono equilibrando la relación carbono-nitrógeno C:N del estiércol (Atandi y Rahman, 2012). La relación ideal de C:N para llevar a cabo el proceso anaerobio está en el orden de 25-30:1, condición que puede ajustarse al mezclar sustratos (Ward et al., 2008). Estudios al respecto, mencionan que la inclusión de residuos agrícolas en un 30% en procesos de co-digestión anaerobia, incrementan la producción de biogás entre 16 a 65% respecto a la degradación del estiércol por si solo (Kalamaras y Kotsopoulos, 2014; Leh-tomäki, et al., 2007; Tufaner y Avşar, 2016).

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), en el ámbito de manejo de residuos agropecuarios ha sido desarrollado por algunos autores. Basnet et al. (2002), utilizaron esta herramienta para identificar y ubicar residuos agropecuarios a escala de cuenca. En Grecia, se utilizó las herramientas

de SIG para estimar la producción de biogás del estiércol de ganado utilizando datos georreferenciados y se obtuvieron modelos predictivos de la producción de energía disponible y biogás (Batziás et al., 2005). En Asia, se han realizado modelos espaciales mediante la utilización de SIG para evaluar los impactos generados por la producción ganadera (Gerber et al., 2005). En Latinoamérica, algunos estudios hacen una aproximación del uso de SIG para el establecimiento de plantas de tratamiento de residuos agropecuarios con un enfoque de valoración energética (Villamar et al., 2016). Pese a que se han realizado estudios similares en varios países, este tipo de análisis aún no se ha hecho en el Ecuador, considerando el potencial energético y agronómico que tiene nuestro país. Además, no se ha establecido valoración geográfica entre los sub-productos obtenidos (biogás, residuos estabilizados) y las zonas donde es factible utilizarlos. Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo, analizar geográficamente zonas factibles para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia a partir de residuos agropecuarios basándose en criterios de sustentabilidad ambiental, económica y social en una zona geográfica en el Ecuador que reporte mayor producción agropecuaria.

## II. MÉTODO

### ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio está comprendida por el territorio ecuatoriano. La República del Ecuador se ubica al noroeste de América del sur; el territorio continental se localiza entre las latitudes 01° 28' N (desembocadura del río Mataje) a 05° 02' S (afluencia quebrada San Francisco) y de longitud 75°11' W (confluencia ríos Napo y Aguarico) a 81° 04' (Isla de La Plata). Limita al norte con Colombia, al sur y al este con Perú y al oeste con el Océano Pacífico y tiene una extensión total de 256 370 km<sup>2</sup> (IGM, 2014). El territorio Ecuatoriano se organiza territorialmente en: Parroquias, las cuales conforman los Cantones, estos las Provincias, y estas a su vez las Regiones Administrativas; cada una de estas entidades y los Distritos Metropolitanos tienen un Gobierno Autónomo Descentralizado, encargado de ejecutar políticas dentro de su ámbito (COOTAD, 2015). Es el octavo país más poblado de Latinoamérica, con alrededor 16,44 millones de habitantes (INEC, 2016). Presenta un clima muy variado debido a la presencia de la cordillera de los Andes y según la influencia del mar, el Ecuador continental se halla climatológicamente dividido en: climas húmedos cálidos, climas subhúmedos y climas secos (Moya, 2006). Ecuador es considerado como uno de los países biológicamente más ricos a nivel mundial ya que cuenta con las más variadas formas de vida en su flora, fauna y microorganismos, en su diversidad genética y en su variedad de ecosistemas (IGM, 2014).

### FUENTES DE INFORMACIÓN

La información cartográfica necesaria para este proyecto de investigación fue basada en coordenadas geográficas UTM proyectadas en DATUM WGS84 en la Zona 17S. Los datos espaciales fueron coberturas vectoriales del área de estudio a nivel cantonal y correspondientes a la división administrativa (provincia/cantón/parroquia), densidad poblacional (centros residenciales), cuerpos de agua (ríos y lagunas) y viabilidad (IGM, 2013). Los datos espaciales de coberturas vectoriales del uso de suelo y aptitud agrícola se obtuvieron del Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP, SINAGAP (2003).

La información espacial y alfanumérica respecto a la producción de cereales (arroz y maíz) y al número de cabezas de gana-

do porcino, bovino y avícola a nivel parroquial se obtuvieron del Censo Agropecuario disponible en Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP, SINAGAP (2016). Los cálculos de cantidad de materia orgánica y la producción de metano de cada tipo de residuo se basaron en los valores teóricos descritos en la Tabla I. Mientras que el potencial energético se obtuvo a partir de la transformación de 1 m<sup>3</sup> de metano equivale a 0,01MW-h descrito por Ishikawa et al. (2006).

**TABLA I**  
VARIABLES CONSIDERADAS PARA LA DETERMINACIÓN DE BIOGÁS A PARTIR DE LOS RESIDUOS AGROPECUARIOS

RUBRO	CANTIDAD DE RESIDUO (kg/animal d) o (t/ha)	MATERIA ORGÁNICA (kg SV/t)	PRODUCCIÓN DE METANO (m <sup>3</sup> /kg SV)
Avícola	0,1 <sup>4</sup>	160 <sup>1</sup>	0,3 <sup>1</sup>
Bovino	10 <sup>4</sup>	160 <sup>1</sup>	0,2 <sup>1</sup>
Porcino	1,5 <sup>4</sup>	160 <sup>1</sup>	0,3 <sup>1</sup>
Arroz	Variable de acuerdo a cada hacienda <sup>3</sup>	81,09% del peso del residuo <sup>2</sup>	0,24 <sup>1</sup>
Maíz		94,97% del peso del residuo <sup>5</sup>	0,24 <sup>1</sup>

Fuente: 1Angelidaki y Ellegaard (2003), 2Jabeen et al. (2015), 3MAGAP, SINAGAP (2016), 4Montalvo y Guerrero (2003), 5Zou et al. (2016).

### PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

La selección de la provincia con mayor potencial energético se realizó mediante la comparación de los datos de producción agrícola obtenidos por el MAGAP del año 2016. El análisis de la información geográfica se realizó con el software ArcGIS 10.2.1 de ESRI, considerando ciertos criterios y factores de limitación. Los criterios de limitación de las áreas con disponibilidad de residuos agropecuarios a nivel parroquial, suponen restricciones económicas: proximidad de la planta de co-digestión anaerobia los residuos resultantes de la actividad agropecuaria (Al Seadi, 2000), generación de materia orgánica mayor a 10 toneladas por día y red de energía mediante las líneas de transmisión (Ma et al., 2005). Restricciones sociales: las cuales se enfocan en los problemas potenciales de olores debido a la proximidad de las áreas residenciales y rutas o vías de acceso (Ma et al., 2005; Pan et al., 2007). Restricciones ambientales: que son aquellas zonas protegidas o bosques, cuerpos de agua superficiales cercanas a las plantas de co-digestión (Ma et al., 2005). Finalmente restricciones físicas: comprendidas como zonas de inundación y pendientes del terreno (Ma et al., 2005). Estos criterios son indispensables para la determinación de sitios sustentables y viables para el emplazamiento de tecnologías centralizadas de co-digestión anaeróbica. Adicionalmente, las coberturas económicas se consideraron como factores de importancia a los cuales se asignó su respectivo peso de aceptabilidad de acuerdo al Proceso de Jerarquía Analítica (PJA) descrito por Saaty (1990). El PJA es una herramienta que captura los aspectos cuantitativos y cualitativos de la información que facilita la toma de decisiones multicriterio (Ma et al., 2005). El PJA permite la comparación de las alternativas en pares para asignarles pesos de importancia. La Tabla II resume la escala de intensidad de importancia para la comparación de pares de alternativas de los factores seleccionados.

Los pesos de importancia de los factores económicos fueron sometidos al Radio de Consistencia (RC) determinado por las ecuaciones:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$



determina la contribución de toneladas de materia orgánica en la determinación de zonas factibles para la implantación de sistemas de co-digestión anaerobia según su uso de suelo. A nivel de fincas, se observa en la Figura 4 que en la época de invierno para arroz y maíz si se sobrepasa las 10 t SV; mientras que, para la época de verano la cantidad no sobrepasa las 10 t SV para arroz y en maíz solamente se observa que una finca sobrepasa las 10t SV/d. Además, se constata que el cereal que aporta mayor cantidad de materia orgánica es el maíz en época de invierno con valores totales de 3140,6 t SV/d en la provincia. La materia orgánica total proveniente del arroz en el ciclo de invierno fue de 177 t/día para el año 2016. En el tercer cuatrimestre de producción de arroz, la cantidad de SV disminuyó a 7,3 t/d en el total de la provincia de Manabí. Para el caso de maíz en el ciclo de invierno en las parroquias Sucre, Rocafuerte, Calceta y Junín la cantidad de SV sobrepasó las 50 t/d; mientras, que en verano no sobrepasó las 29 t SV/día. Con respecto al uso de suelo los residuos generados por la producción de arroz y maíz potencialmente ocupan zonas con propiedad agropecuaria, debido a que el mayor uso de suelo de la población está destinado a tierras agrícolas. Por otro lado, en el periodo de invierno, tanto el maíz como el arroz se distribuyeron cerca de los cuerpos de agua y ocuparon algunas zonas de bosques.

La Figura 5 resume la distribución de materia orgánica (t SV/d) del estiércol de ganado en la provincia de Manabí a nivel de fincas. Con respecto al estiércol de ganado avícola, la generación de SV no alcanzó las 10 t/d, localizándose en las parroquias: Abdón Calderón, Andrés de Vera, Ángel Pedro Giler, Ayacucho, Bahía de Caraquez, Calceta, Canuto, Chone, Colón, El Anegado, El Carmen, El Colorado, Flavio Alfaro, Jipijapa, Junín, La Pila, Leonidas, Plaza Gutiérrez, Lodana, Montecristi, Picoaza, Ricaurte, Rocafuerte, San Pedro de Suma, Santa Ana, Santa Rita, Sucre y Wilfrido Loor Moreira. Para este rubro, en total se generó 91,3 t SV/d en la provincia de Manabí. Para el rubro porcino la cantidad de SV no sobrepasó las 10 t/d en cada parroquia. La parroquia Wilfrido Loor Moreira generó la mayor cantidad de SV procedentes de ganado porcino con 1,21 t/d, en total se generó 3 t SV/d en la provincia de Manabí. Por otro lado, el ganado bovino se distribuyó a lo largo de toda la provincia de Manabí, pero cada finca no superó las 10 t SV/d. En total, se generó 1.435 t SV/d procedente del ganado bovino en la provincia de Manabí. Además, respecto a la Figura 5 y relacionado con el uso de suelo, el ganado avícola y porcino ocuparon algunas zonas destinadas a tierras agropecuarias; mientras, que el ganado bovino se localizó en zonas de bosques, cuerpos de agua, tierras agropecuarias y en vegetación arbustiva de la provincia de Manabí. Esta condición revela el tipo de actividad pecuaria existente en la provincia, basada en producción intensiva y semi-intensiva de ganado porcino y avícola y de tipo extensiva para el ganado bovino.

Los pesos de importancia de los factores según el PJA obtenidos fueron: 0,64 para el factor de proximidad de los posibles sitios de implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia a las haciendas; 0,28 para el factor de proximidad a las vías de transporte y 0,07 para el factor proximidad a las líneas de transmisión de energía. Se determinó que el factor que tiene un gran peso de importancia es la proximidad de los posibles sitios de implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia a las haciendas; mientras que la proximidad a las líneas de transmisión de energía representa un menor peso de importancia en comparación con los otros dos factores: proximidad a las haciendas, proximidad a las vías de transporte.

Las Figuras 6 y 7 describen las zonas factibles en función de las restricciones físicas, económicas, sociales y ambientales para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia en época de invierno y verano respectivamente en la provincia de Manabí. Las restricciones físicas están comprendidas por las pendientes mayores al 15% y por las zonas de inundación. Las restricciones económicas están comprendidas por las distancias menores a 200 metros de la red de energía (líneas de transmisión), proximidad de las haciendas y terrenos de agricultura a las zonas factibles y las cargas de residuos mayores a 10 t SV/d. Las restricciones sociales están comprendidas por la distancia a las zonas pobladas debido a la generación de olores y distancia a los caminos. Finalmente, las restricciones ambientales definidas por las áreas correspondientes a cuerpos de agua dulce (ríos y lagunas), áreas de protección ambiental (bosques) y aguas subterráneas no permeables. En total las zonas no restringidas en época de invierno se localizan en 30 parroquias al sur de la provincia de Manabí y corresponde a un área de 1524,3 km<sup>2</sup> (8%) de la provincia. En época de invierno las zonas no restringidas o de factibilidad se localizan en la parroquia de Portoviejo ocupando un área de 33,35 km<sup>2</sup> (0,17%) de la provincia como lo indica la Figura 7.

Con respecto al potencial de generación de energía procedente de los residuos agropecuarios en las zonas factibles para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia en la provincia de Manabí en invierno y verano respectivamente se obtuvo que el mayor potencial energético lo aportan los cereales (arroz y maíz) con 7582,7 MW-h de energía a partir de biogás, seguidamente el ganado bovino con 1155 MW-h, luego el ganado avícola con 195 MW-h y por último el ganado porcino que aporta con 4,1 MW-h de energía a partir de biogás. En total en la época de invierno en las parroquias factibles a ser implantados dichos sistemas de tratamiento se generarían 8937,2 MW-h de energía procedente de los residuos agropecuarios. Mientras que en la época de verano la parroquia de Portoviejo aporta con 10,5 MW-h a la provincia de Manabí.

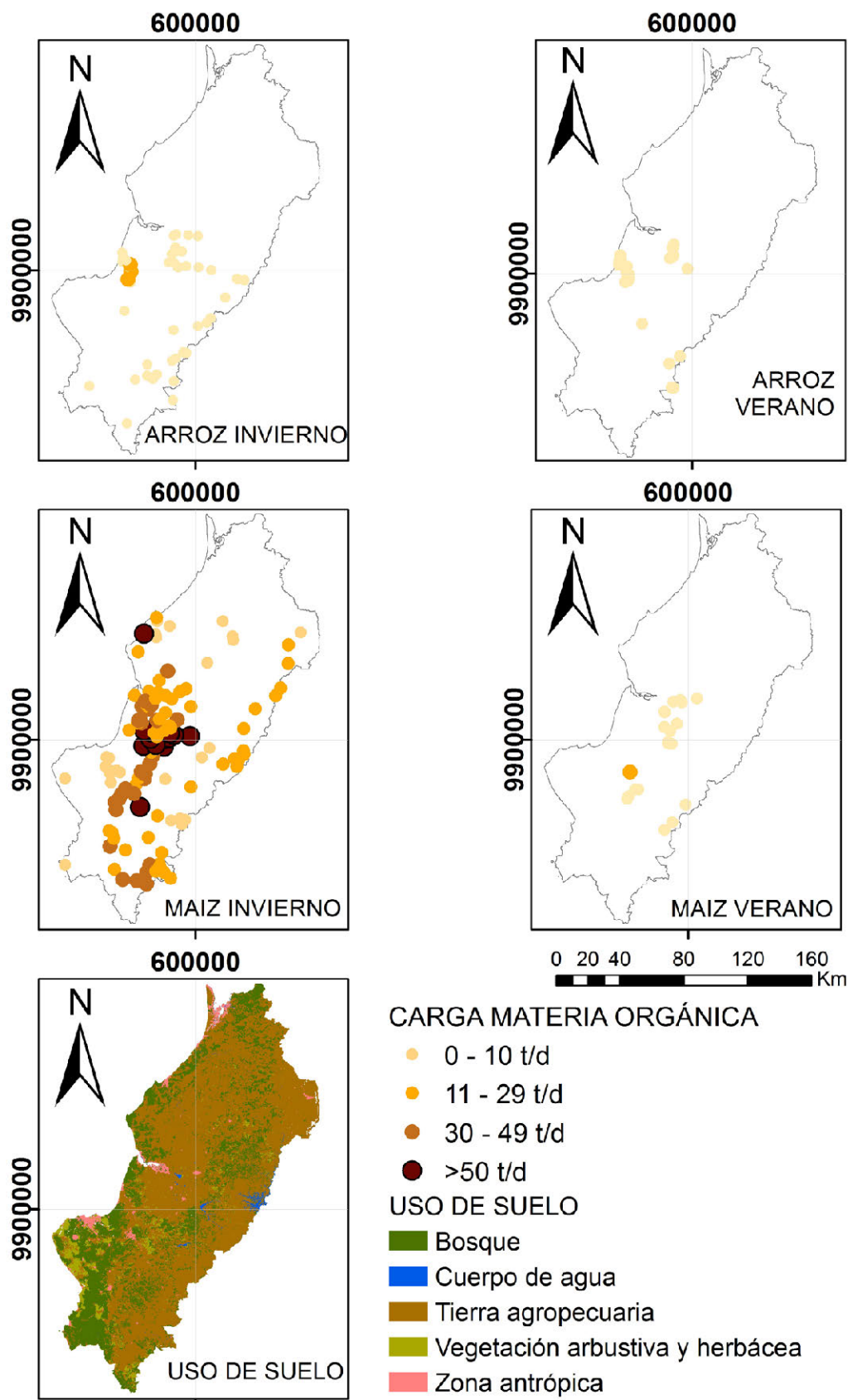
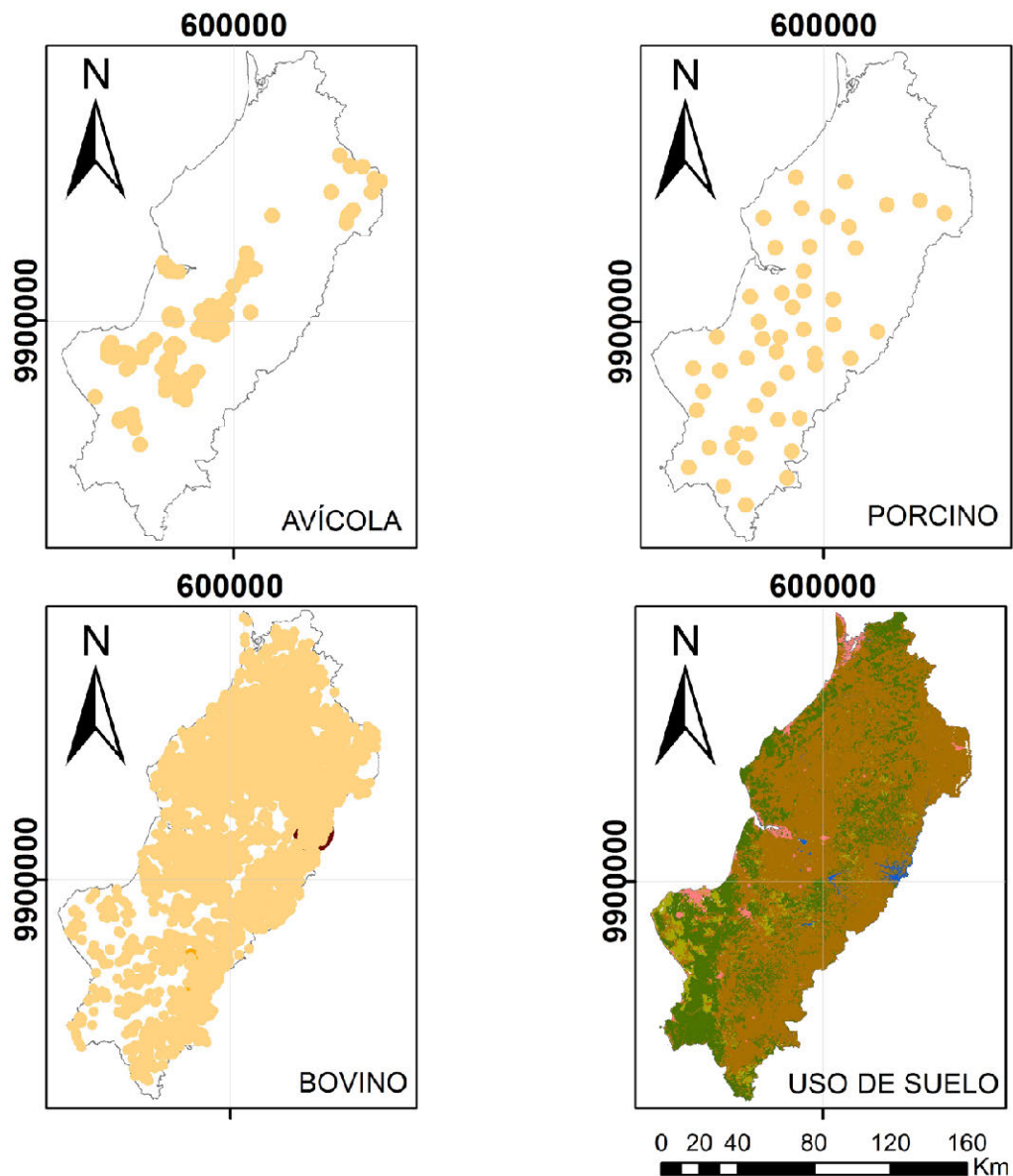


Figura 4. Distribución en invierno y verano del contenido de materia orgánica de cereales en fincas en la provincia de Manabí expresado en toneladas por día (representado en círculos) y uso de suelo a nivel de la provincia de Manabí.



TONELADAS DE SÓLIDOS VOLÁTILES

- 0 - 10
- 11 - 29
- 30 - 49
- >50

USO DE SUELO MANABI

- Bosque
- Cuerpo de agua
- Tierra agropecuaria
- Vegetación arbustiva y herbácea
- Zona antrópica

Figura 5. Distribución de materia orgánica en toneladas por día de ganado avícola, bovino y porcino en Manabí (representado en círculos) y uso de suelo en esta provincia

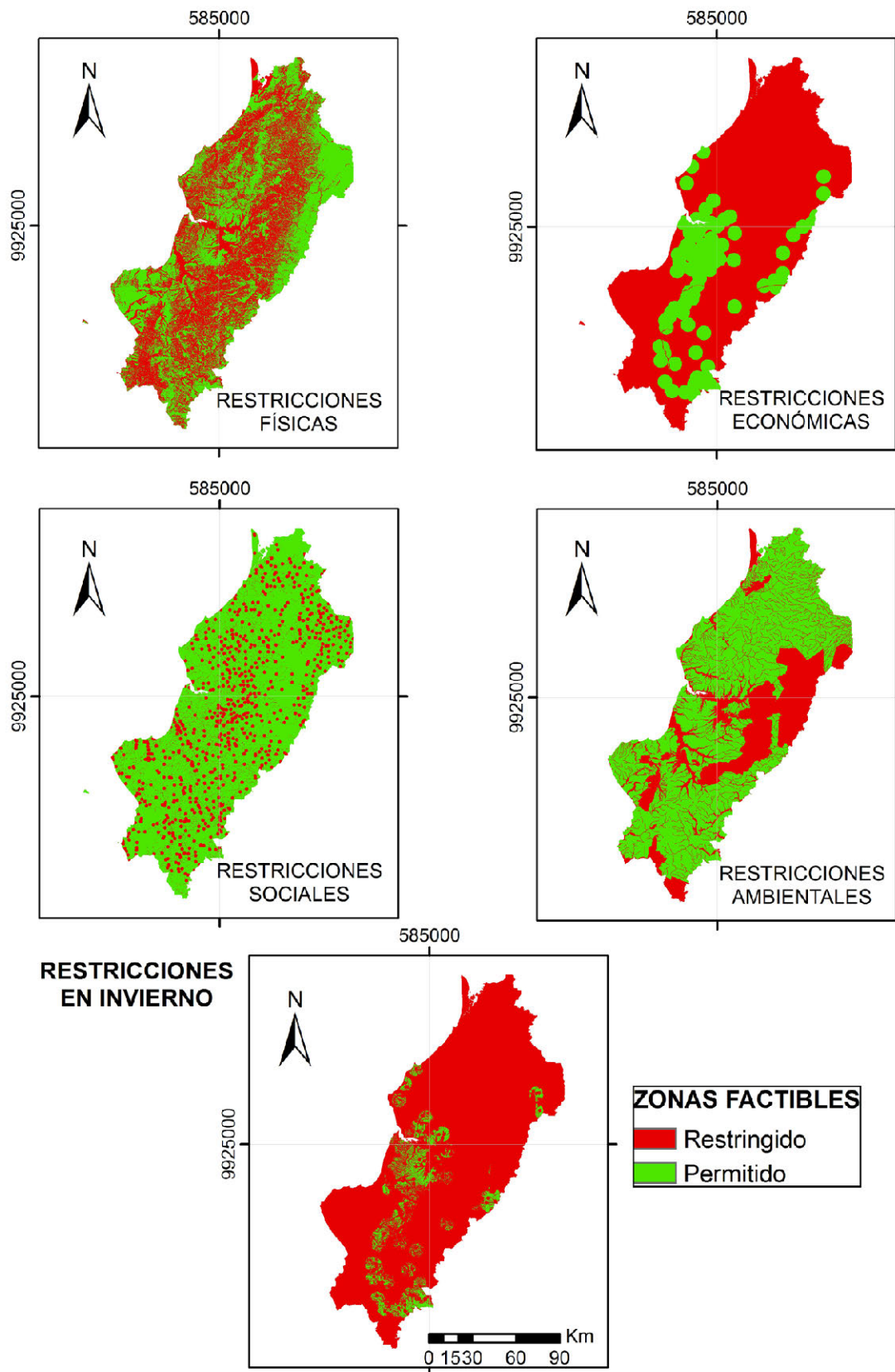


Figura 6. Zonas factibles en función de las restricciones físicas, económicas, sociales y ambientales para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia en época de invierno en Manabi



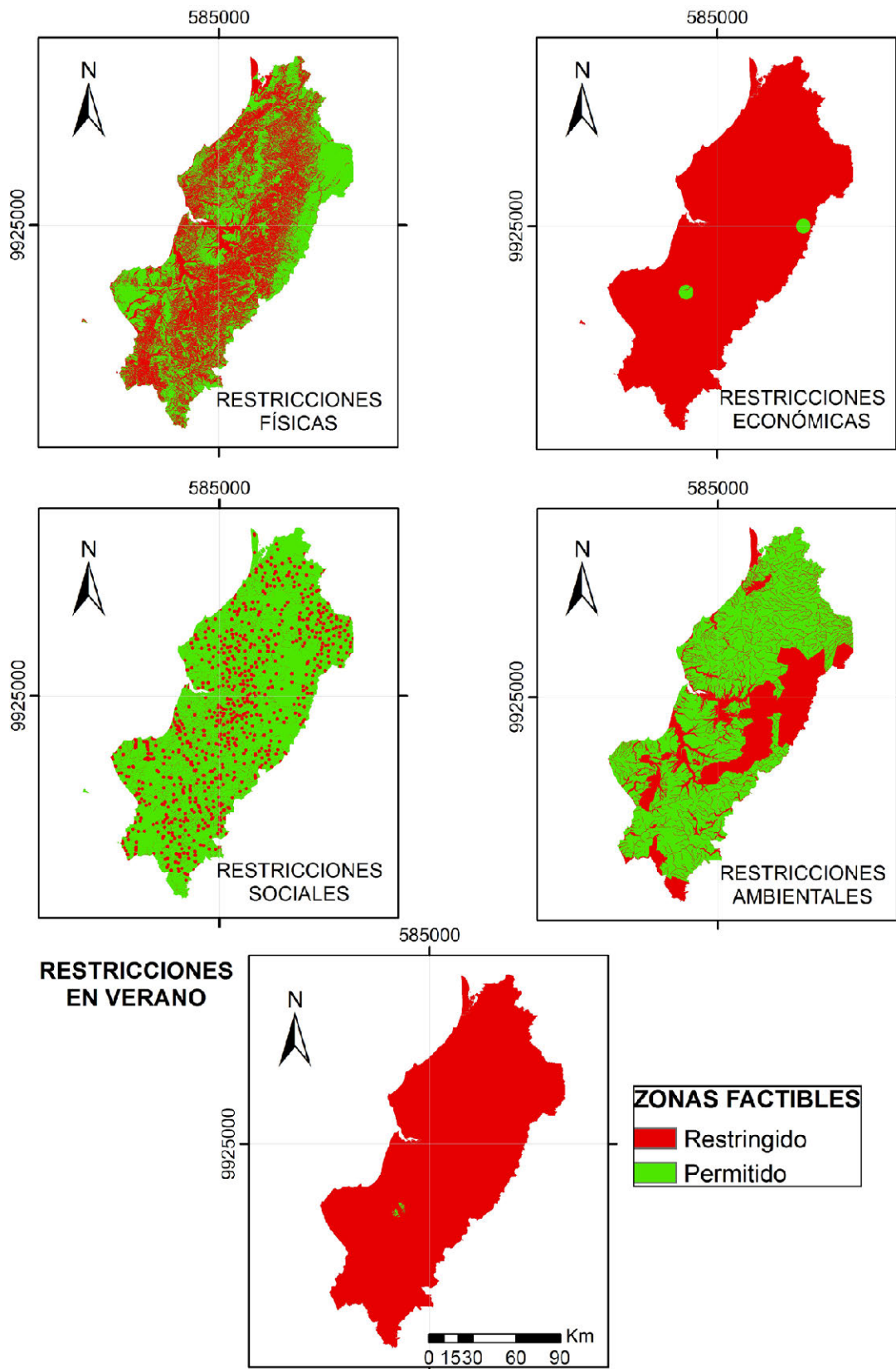


Figura 7. Zonas factibles en función de las restricciones físicas, sociales, económicas y ambientales para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia en época de verano en Manabí

#### IV. CONCLUSIONES

La provincia de Manabí es la más adecuada para la re-valorización de residuos agropecuarios a partir de co-digestión anaerobia, pues consta con la mayor superficie de labor agropecuaria a nivel nacional y su producción agropecuaria con respecto a cereales y ganadería es representativa del total nacional. Adicionalmente, en Manabí existe una mayor producción de materia orgánica de residuos provenientes del maíz en la época de invierno, los cuales sobrepasan las 50 toneladas de SV por día en las parroquias Sucre, Rocafuerte, Calceta y Junín. Mientras, que el ganado bovino lidera en producción total de materia orgánica en toda la provincia de Manabí, pues su distribución cubre casi toda la provincia. La razón radica que en producción ganadera, Manabí lidera a nivel nacional. El ganado bovino, en esta provincia ocupa zonas importantes de vulnerabilidad ambiental como cuerpos de agua y bosques, lo cual implica un estudio posterior enfocado a tratamiento que no considere este espacio físico en la provincia.

Con respecto a la importancia de los factores, la proximidad de las haciendas a las zonas factibles de implantación de sistemas de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia de residuos agropecuarios tiene un gran peso de importancia frente a los factores de proximidad a las vías de transporte y líneas de transmisión de energía porque la materia orgánica

que aporta cada hacienda debe estar lo más próxima posible a los sistemas de tratamiento para que haya una mayor generación de energía y aprovechar al máximo la materia orgánica.

Las zonas establecidas como factibles o de sustentabilidad para la implantación de sistemas de tratamiento de co-digestión anaerobia representan el 8% del área total de la provincia de Manabí en invierno y el 0,17% de la superficie de la provincia en época de verano. Esta gran diferencia se debe a que en época de invierno existe mayor facilidad y acceso a los recursos naturales como el agua y suelo agrícola, mientras que en verano se evidencia la disminución de zonas factibles por la baja producción agropecuaria.

El potencial de generación de energía a partir de biogás en las zonas factibles, correspondió a 8937,2 MW-h en la época de invierno. Mientras que en la época de verano la parroquia de Portoviejo aporta con 10,5 MW-h a la provincia de Manabí.

Por lo tanto, este estudio geográfico preliminar en donde se identificó y cuantificó el potencial de generación de residuos agropecuarios en Manabí, abre oportunidades respecto a identificar las zonas factibles sustentablemente para la implantación de sistemas de co-digestión anaerobia, siendo una fácil herramienta de toma de decisiones en la gestión geográfica de los residuos agropecuarios.

#### AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación fue realizado con la colaboración del Grupo de Investigación en Tecnologías Ambientales (GITA).

#### REFERENCIAS

- Angelidaki, I. y Ellegaard, L. (2003). Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 109, 95-105.
- Al Seadi, T. (2000). Danish Centralised Biogas Plants-Plants descriptions. Bioenergy Department, University of Southern Denmark, 27pp.
- Álvarez, R. y Lidén, G. (2008). Anaerobic co-digestion of aquatic flora and quinoa with manures from Bolivian Altiplano. *Waste management*, 28(10), 1933-1940.
- Atandi, E. y Rahman, S. (2012). Prospect of anaerobic co-digestion of dairy manure: a review. *Environmental Technology Reviews*, 1(1), 127-135.
- Basnet, B. B., Apan, A. A., Raine, S. R. (2002). Geographic information system based manure application plan. *Journal of Environmental Management*, 64(2), 99-113.
- Batzias, F. A., Sidiras, D. K. y Spyrou, E. K. (2005). Evaluating livestock manures for biogas production: a GIS based method. *Renewable Energy*, 30(8), 1161-1176.
- COOTAD. Registro Oficial Suplemento 303 de 19-oct.-2010. TITULO II: Organización del territorio. Quito, Ecuador, 16 de enero de 2015
- ESPA-INEC, Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2015). Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua- ESPAC 2015. Recuperado de: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/estadisticas-agropecuarias-2/> (revisado: febrero, 2017).
- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1996). Enseñanzas de la revolución verde: hacia una nueva revolución verde. Recuperado de <http://www.fao.org/docrep/003/w2612s/w2612s06.htm> (revisado: mayo, 2017).
- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (1996). Environmental Impact of Animal Manure Management. Recuperado de <http://www.fao.org/WAIRDOCS/LEAD/X6113E/x6113e00.htm#Contents> (revisado: abril, 2017).
- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). El estado mundial de la agricultura y la alimentación: La ganadería a examen. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/012/i0680s/i0680s00.htm> (revisado: diciembre, 2016).
- FAO-Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (2016). La Ganadería y el medio ambiente. Recuperado de <http://www.fao.org/livestock-environment/es/> (revisado: diciembre, 2016).
- FAOSTAT. (2016). Compare data [Gráfico]. Recuperado de <http://www.fao.org/faostat/en/#compare> (revisado: febrero, 2017).
- Flores, T. (2014). Evaluación del comportamiento del proceso de digestión anaerobia, de las aguas residuales del matadero municipal de Cochabamba Rada & Asociados S.A (tesis de pregrado). Universidad del Valle, Cochabamba, Bolivia. 5-11.

- Gerber, P., Chilonda, P., Franceschini, G., Menzi, H. (2005). Geographical determinants and environmental implications of livestock production intensification in Asia. *Bioresource Technology*, 96(2), 263-276.
- Herrero, M., Gil, S. (2008). Consideraciones ambientales de la intensificación en producción animal. *Ecología austral*, 18(3), 273-289.
- Hristov, A.N., Oh, J., Lee, C., Meinen, R., Montes, F., Ott, T., Firkins, J., Rotz, A., Dell, C., Adesogan, A., Yang, W., Tricarico, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Dijkstra, J., Oosting, S. (2013). Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera - Una revisión de las opciones técnicas para la reducción de las emisiones de gases diferentes al CO<sub>2</sub>. Editado por Pierre J. Gerber, Benjamin Henderson y Harinder P.S. Makkar. *Producción y Sanidad Animal* FAO Documento No. 177. FAO, Roma, Italia. 1-6.
- IGM-Instituto Geográfico Militar. (2013). Cartografía de libre acceso. Recuperado de: <http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/index.php/descargas/cartografia-de-libre-acceso/> (revisado: diciembre, 2016).
- IGM-Instituto Geográfico Militar. (2014). Contextos históricos y políticos generales. *Atlas Geográfico de la República del Ecuador*, 2013, 19-28.
- IGM-Instituto Geográfico Militar. (2014). El medio ambiente. *Atlas Geográfico de la República del Ecuador*, 2013, 245-250.
- INEC-Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2016). Contador poblacional. Recuperado de <http://www.ecuadorcencifras.gob.ec/estadisticas/>
- Ishikawa, S., Hoshiba, S., Hinata, T., Hishinuma, T., Morita, S. (2006). Evaluation of a biogas plant from life cycle assessment (LCA). *International Congress Series*, 1932, 230-233.
- Jabeen, M., Zeshan, Yousof, S., Haider, M. R. y Malik, R. N. (2015). High-solids anaerobic co-digestion of food waste and rice husk at different organic loading rates. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 102, 149-153.
- Kalamaras, S. D., y Kotsopoulos, T. A. (2014). Anaerobic co-digestion of cattle manure and alternative crops for the substitution of maize in South Europe. *Bioresource Technology*, 172, 68-75.
- Lehtomäki, A., Huttunen, S., y Rintala, J. A. (2007). Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to manure ratio. *Resources, Conservation and Recycling*, 51(3), 591-609.
- Lettinga, G. (1995). Anaerobic digestion and wastewater treatment systems. *Antonie van Leeuwenhoek*, 67(1), 3-28.
- Li, R., Chen, S., y Li, X. (2009). Anaerobic Co-digestion of Kitchen Waste and Cattle Manure for Methane Production. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(20), 1848-1856.
- Ma, J., Scott, R., DeGloria, S., Lembo, A.J. (2005). Siting analysis of farm-based centralized digester systems for distributed generation using GIS. *Biomass and Bioenergy*, 28, 591-600.
- Menzi, H., Oenema, O., Burton, C., Shipin, O., Gerber, P., Robinson, T. y Franceschini, G. (2010). Impacts of Intensive Livestock Production and Manure Management on the Environment. *Island Press*, 1, 1-26.
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP, SINAGAP. (2003). Catálogo de Datos-Metadatos. Recuperado de: [http://geoportal.agricultura.gob.ec/catalogo\\_datos/visualizador.html](http://geoportal.agricultura.gob.ec/catalogo_datos/visualizador.html)
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP, SINAGAP. (2014). Censos y Encuestas: III Censo Nacional Agropecuario, Censos Sectoriales: avícola, florícola y Censo de Impacto de Invierno 2012. Recuperado de: <http://sinagap.agricultura.gob.ec/index.php/resultados-censo-provincial> (revisado: diciembre, 2016).
- Ministerio de Agricultura, Ganadería, Acuacultura y Pesca - MAGAP, SINAGAP. (2016). Catálogo de Datos-Metadatos. Recuperado de: [http://geoportal.agricultura.gob.ec/catalogo\\_datos/visualizador.html](http://geoportal.agricultura.gob.ec/catalogo_datos/visualizador.html) (revisado: enero, 2017).
- Montalvo, S y Guerrero, L. (2003). Tratamiento anaerobio de residuos. Chile: Universidad Técnica Federico Santa María.
- Monteros, A y Salvador, S. (2015). Panorama Agroeconómico Del Ecuador Una Visión Del 2015. Dirección de Análisis y Procesamiento de la Información MAGAP, 1-16.
- Moya, R. (2006). Climas del Ecuador. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología -INAMHI-, 1-10.
- Osterberg, D., y Wallinga, D. (2004). Addressing Externalities from Swine Production to Reduce Public Health and Environmental Impacts. *American Journal of Public Health*, 94(10), 1703-1708.
- Pan, L., Yang, S.X., DeBruyn, J. (2007). Factor analysis of downwind odours from livestock farms. *Biosystems Engineering*, 96(3), 387-397.
- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- Sims, J. T., y Wolf, D. C. (1994). Poultry Waste Management: Agricultural and Environmental Issues. *Advances in Agronomy*, 52, 1-83.
- Tufaner, F., y Avşar, Y. (2016). Effects of co-substrate on biogas production from cattle manure: a review. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 13(9), 2303-2312.
- Villamar, C. A., Rivera, D., y Aguayo, M. (2016). Anaerobic co-digestion plants for the revaluation of agricultural waste: Sustainable location sites from a GIS analysis. *Waste Management & Research: The Journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 34(4), 316-326.
- Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., y Jones, D. L. (2008). Optimization of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresource Technology*, 99(17), 7928-7940.
- Zou, S., Wang, X., Chen, Y., Wan, H. y Feng, Y. (2016). Enhancement of biogas production in anaerobic co-digestion by ultrasonic pretreatment. *Energy Conversion and Management* 112, 226-235.



# Consideraciones metodológicas para la elaboración de una prospección arqueológica utilizando herramientas SIG

Mora Miguel Angel

Ingeniería Catastral y Geodesia/  
Facultad de Ingeniería/Universidad  
Distrital Francisco José de Caldas  
Carrera 8 # 40-62/Bogotá/Colombia  
Mamora2011@gmail.com

## RESUMEN

Este trabajo pretende dar a conocer los procesos metodológicos que permiten asociar herramientas tecnológicas (software y hardware) y la disciplina de la arqueología y como la relación entre áreas diversas del conocimiento como la topografía, la geografía por mencionar algunas, pretenden mejorar los procesos arqueológicos mediante estrategias metodológicas, en las cuales, intervienen tanto procesos manuales como informáticos, divididas en fases que dan al ejercicio arqueológico herramientas para visualizar, organizar, archivar y actualizar información de tipo alfanumérica y geográfica permitiendo maximizar los resultados obtenidos en una prospección arqueológica, esto da un valor agregado a la recolección de información por parte del arqueólogo al relacionarla al espacio, generando de esta forma, datos con una mayor calidad, obteniendo análisis diversos de zonas de estudio intervenidas en diferentes lapsos.

Palabras clave: **Sistema de información geográfica, Prospección arqueológica, procesos metodológicos, arqueología, espacio.**

## ABSTRACT

*This work aims to present the methodological processes that allow to associate technological tools (software and hardware) and the discipline of archeology and how the relationship between different areas of knowledge such as topography, geography to mention some, try to improve the archaeological processes through Methodological strategies, in which both manual and computer processes intervene, divided into phases that give the archaeological exercise tools to visualize, organize, archive and update alphanumeric and geographic information allowing maximize the results obtained in an archaeological survey, this gives a Added value to the collection of information on the part of the archaeologist when relating it to the space, generating of this form, data with a greater quality, obtaining diverse analyzes of zones of study intervened in different periods.*

**Keywords: Geographic information system, Archaeological survey, methodological processes, Archeology, Space.**

## I. INTRODUCCIÓN

Desde hace décadas los Sistemas de Información Geográfica son parte importante en el desarrollo de cualquier proyecto que tenga como aspecto primordial el territorio, la recopilación de información de tipo alfanumérica que se pueda asociar a una porción de espacio cada vez acoge más importancia toda vez que es imperativo no solo conocer la ubicación de un punto en el espacio si no darle a ese punto información representativa para diferentes áreas de conocimiento como lo dice (San Miguel Mate, 1992) "Pese a la multiplicación y mejora de los estudios basados en la prospección y los notables intentos por diseñar un esquema de trabajo para los proyectos de «Arqueología Territorial», se echa en falta en la generalidad de los trabajos un verdadero apartado en el que se recoja el planteamiento de la prospección y se realice un análisis de su desarrollo." Por tal motivo, las soluciones tecnológicas proporcionadas mediante herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) a una disciplina que se considera alejada de la ingeniería como es la arqueología<sup>1</sup>, presenta la ventaja que el software actual es de fácil manejo para personas no especialistas, esto permite resolver problemas asociados al registro de la información y su posterior consulta, problemas que ha tenido la arqueología a lo largo de su desarrollo disciplinar, dejando claro que para este tema los sistemas de información geográfica solo son usados como una herramienta para la elaboración de cartografía básica; desde esa premisa el artículo presenta el SIG como una herramienta que traspasa la elaboración de cartografía, esto sucede al poder facilitar las soluciones a los temas inherentes al espacio que necesita resolver la arqueología en el momento de analizar la dimensión tridimensional de los ítems arqueológicos ya sea artefactos o ecofactos<sup>2</sup>.

Es importante mencionar que el proceso de aseguramiento de la información obtenida en el desarrollo de las labores de arqueología en campo ha presentado falencias, posiblemente debido a la cantidad de información que se requiere y que a su vez se genera al momento de hacer una prospección arqueológica<sup>3</sup>, esto lo evidenció (Arroyo-Bishop, 1991, p. 1) donde manifiesta que la arqueología está obligada a gestionar grandes masas de información, y no solo la creación de esta si no que es necesaria la gestión y conservación de la misma. Debido a que no solo es información del material encontrado sino que también es necesario recolectar información inherente a las características del espacio en donde se realiza la prospección y por ende se ubica el material encontrado, por ejemplo, paisaje, tipo de suelo, profundidades de los hallazgos, entre otras, estas características en la actualidad son obtenidas de una forma manual y no permiten una estandarización de la información porque no se cuenta con alto nivel de aseguramiento o registro de la información. Obviamente esto ha supuesto un fuerte aumento del coste material y humano para poder cumplir los objetivos, limitando la capacidad de abarcar extensiones mayores. (Mayoral Herrera, Cerrillo Cuenca, & Celestino Pérez, 2009, p. 2)

Si bien, estos procesos se pueden generar de una forma manual, es necesario entender que si la información recopilada a lo largo de un proyecto arqueológico se almacena de una

manera organizada que permitirá un mejor resultado, además de ser actualizada continuamente; es en ese punto donde se presenta un problema entre las formas tradicionales de almacenar la información y la aplicación de nuevas herramientas metodológicas que permiten la recolección de información, el archivo de esta y su posterior consulta y actualización; permitiendo esto el tránsito entre la arqueología y la geografía. (Araneda, 2002). Este problema se abordó al definir los criterios metodológicos en la elaboración de una prospección arqueológica empleando las herramientas SIG. Este trabajo busca hacer aportes al proceso de almacenamiento y aseguramiento de la información.

## II. MÉTODO

Mediante estrategias de organización de la información se determinó los criterios para la recopilación de datos alfanuméricos que se podrán obtener en una prospección arqueológica. Esto se hizo utilizando herramientas SIG (Software y Hardware) con el fin de establecer las posibles fases dentro del proceso de una prospección. De esta manera, los criterios metodológicos al ser definidos permitan la estandarización de procesos, organización y recolección de la información. De esta manera, definir un criterio dentro del proceso de elaboración de una prospección arqueológica desde su planeación optimizaría cada uno de los procesos inherentes al trabajo mencionado y se obtendría un nivel de aseguramiento y almacenamiento del 100% de la información recolectada. Esta información es asociada a un punto geográfico lo que permite realizar diferentes análisis enmarcados en una zona geográfica. Asimismo, estas estrategias organizativas dieron la posibilidad de la elaboración de una ficha de trabajo constituida con criterios previamente establecidos relacionados con información paisajística; esto permitió la estandarización de los procesos de recolección de información arqueológica.

Simultáneamente, para identificar en el espacio la presencia de evidencias o modificaciones antrópicas sobre el terreno, la prospección de superficie como método de recogida de material arqueológico o de descubrimiento de yacimientos. Este método inicialmente debió considerar las variables físicas del área en donde se hizo la prospección; estas se registrarán en una ficha de campo. En la Tabla I. Ficha información arqueológica (Ver Anexo 1), se presentan algunos criterios utilizados. Este es uno de los objetivos trazados por (Fernández, 2001) "dar con un método iterativo que permita la recogida, digitalización y contextualización de la información planimétrica" De igual modo, se debe considerar el componente geográfico el cual determinará la ubicación de cada uno de los pozos de sondeo y finalmente, se asegura que la información capturada en campo como la información de posición de cada uno de los puntos se pueda almacenar y consultar.

Durante el desarrollo de esta metodología se hizo necesario describir conceptos importantes como el concepto del espacio, teniendo como referencia dos significados; el primero lo ve como el contenedor de todo, y el segundo, lo considera de manera correlacional de cosas u objetos que interactúan entre sí y con el mismo territorio. Es en ese preciso instante donde la

1 La arqueología, etimológicamente significa: arqueo-pasado, logia-conocimiento, entonces tenemos el conocimiento Del pasado pero a partir de la cultura material (conversación personal con el antropólogo Jorge Huertas).

2 Los artefactos, son aquellos objetos realizados o modificados por el hombre y los ecofactos, son restos orgánicos y medioambientales como parásitos, polen, sedimentos, huesos, entre otros. Son aquellos productos naturales, pero que el hombre llevó a un lugar determinado. Por ejemplo, un tronco de árbol sin tallar que usarían como poste.

3 La prospección arqueológica es una técnica que se emplea para la revisión del suelo mediante la realización de sondeos para identificar el potencial arqueológico de un área o polígono.

herramienta SIG entra en juego al recopilar la información que aportan las evidencias encontradas por los arqueólogos y darles un contexto espacial; este tipo de análisis e inferencias se consigue elaborando una distribución espacial planteada dentro de una metodología de recolección de la información y asignando lo que se denomina una geometría al proceso arqueológico dependiendo de la etapa del proceso<sup>4</sup> en la cual se utilice el SIG. El proceso metodológico descrito hasta el momento se dividió en tres fases que se describirán a continuación:

### 1 FASE DE PRE-CAMPO

En esta fase se revisa la información secundaria y cartográfica concerniente al área del proyecto, con el objetivo de realizar un análisis del paisaje, enfocándose en áreas adecuadas para el asentamiento de poblaciones humanas. Como bien lo expresa Amado Reino en su artículo La aplicación del GPS a la Arqueología. Trabajos de prehistoria cuando habla de la importancia de los GPS "La posibilidad de apoyo en esta tecnología puede tener lugar en diversos momentos de la práctica arqueológica. La primera de ellas es el propio apoyo en las labores de topografía y levantamientos planimétricos de las fases preliminares de una intervención arqueológica. En este momento el GPS no sólo aportará una gran precisión, sino que también dotará de agilidad al trabajo permitiendo unos rendimientos excelentes en un tiempo inferior al que sería necesario con la topografía clásica. (Amado Reino, 1997, p. 6). Como parte de la información necesaria para el adecuado desarrollo del proyecto se elabora un formato de recolección de datos en campo, el cual, permite la estandarización de la información recuperada durante las labores ejecutadas.

Como parte de los trabajos a ser desarrollados en campo consisten en la localización de puntos de sondeos a lo largo del terreno, durante la fase de pre-campo, se debe desarrollar mediante un Software una serie de puntos geo referenciados con el objetivo de generar un corpus de información conciso y coherente compuesto principalmente de la codificación de cada uno de los puntos generados, ya que esto permitirá que exista cierta correlación entre la ficha de toma de dato e información alfanumérica y el punto que contiene la información geográfica. En la Figura 1, se presenta la información alfanumérica en el diseño de un esquema para una prospección arqueológica.

### 2 FASE DE CAMPO

El inicio de las actividades de campo está determinado principalmente por la verificación de cada uno de los puntos cargados al dispositivo navegador y la posterior remarcación de cada uno de los puntos en el mismo. Esto se lleva a cabo con el objetivo de obtener datos como la altura y la ubicación real del pozo de sondeo, una vez se identifica el punto se procede a llenar la información requerida en la ficha de prospección arqueológica (Figura 1) y al registro fotográfico necesario para cada uno de los puntos que se encuentran dentro de la zona de trabajo. Es en este punto donde los SIG comienzan parte de su función primaria y es el almacenamiento de la información día a día, ya que cada ficha registrada es ingresada a una base de datos geográfica permitiendo el continuo crecimiento de información. Teniendo presente que mediante el uso de estas herramientas se puede visualizar el yacimiento arqueológico no como un punto si no como un espacio en el que se recuperan materiales u observan evidencias y que se reconoce como susceptible de ser delimitado sobre el terreno y el espacio (Amado Reino, 1997).

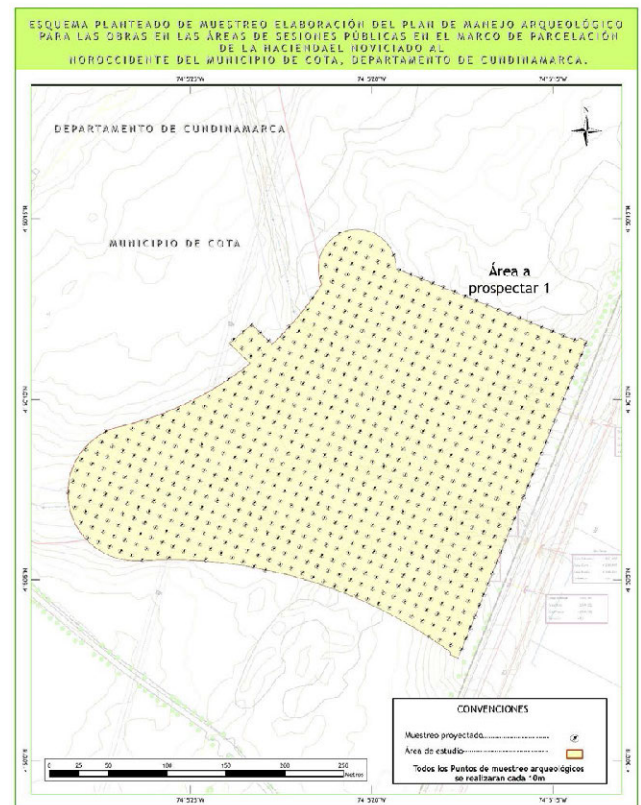


Figura 1 Esquema de prospección (Jorge Huertas, 2015)

### 3 FASE POST CAMPO

La última fase en los trabajos de arqueología, se lleva a cabo una vez se ha realizado el levantamiento de los datos en campo, donde, como se ha mencionado anteriormente se recoge información relacionada a las características del terreno, el paisaje y a la caracterización de las posibles áreas con evidencias culturales, al igual que la sistematización de las fichas de registro de información arqueológica correspondientes a cada arqueólogo. Por lo tanto, una vez sistematizada la información se procede a la integración de las bases de datos espaciales, esto se logra mediante la implementación de una base de datos geográfica modelada en un motor de bases de datos que permite la inserción de formularios para capturar la información y almacenarla de manera digital, con el fin de realizar el análisis de cada una de las variables consignadas en la ficha de registro, como es la textura del suelo, profundidad, color, tipo de horizonte, sondeos descartados, negativos y positivos, producto de la obtención de estas variables por cada uno de los pozos de sondeo realizados, se adquirirán datos concretos sobre la estructura y composición de los sitios arqueológicos o de aquellas áreas que no presentan evidencias culturales.

Esta información se obtiene mediante el uso de los sistemas de información geográfica asociando cada variable a dicho punto que representa el sondeo realizado y su interrelación con la toma de datos durante la visita a campo; es esta interrelación que puede generar la cartografía temática necesaria para entender los cambios en el paisaje, y las complejas distribuciones de las evidencias arqueológicas sobre áreas o extensiones de terreno considerables (Figura 2).

<sup>4</sup> Prospección, monitoreo, rescate o diagnóstico, enmarcado en los programas de arqueología preventiva.

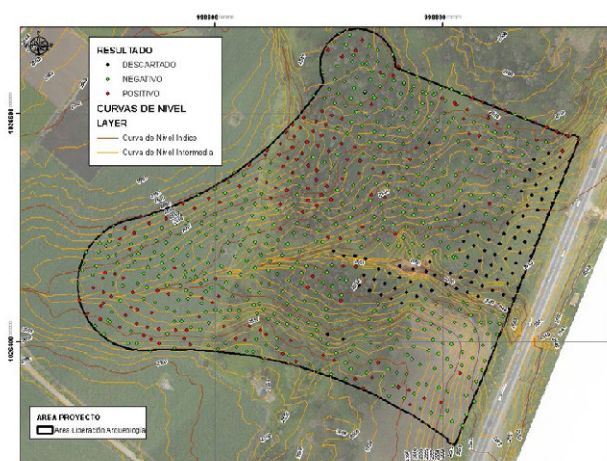


Figura 2 Distribución de sondeos positivos en una prospección arqueológica en El Noviciado-Cota (Jorge Huertas, 2015)

### III. RESULTADOS

Uno de los resultados obtenidos dentro de los procesos de recolección de datos en las fases del trabajo arqueológico, es la planeación del trabajo, la recolección de información y el almacenamiento. El uso de esta herramienta tecnológica da la posibilidad de incorporar datos procedentes de trabajos de campo con GPS y la generación de triangulaciones, curvados y modelos tridimensionales los cuales se utilizan para realizar interpretaciones del paisaje. Esta información es utilizada por los arqueólogos para conocer cómo las poblaciones humanas hacían uso y control de los recursos, asimismo, cuáles eran las estrategias para la ocupación de un territorio.



Figura 3 Vista 3D prospección arqueológica en el noviciado Cota.(Jorge Huertas, 2015)

Además de contar con los diferentes datos asociados al terreno también se tiene acceso a la información de cada uno de los pozos de sondeos realizados esta información es la que se registró en la ficha, es decir, se tiene una ficha de registro por cada pozo de sondeo y a su vez esta puede ser ingresada en una base de datos con lo cual se obtiene información alfanumérica asociada a un punto geográfico y al tener varios puntos geográficos se puede tener una imagen clara de una zona determinada relacionando cada parte del registro a un punto geográfico por ejemplo color de suelo, textura, etcétera.

Los factores controlables se refieren básicamente a las unidades de documentación (o de observación), esto es, a las entidades espaciales que sirven de base para la inspección del terreno y de referencia para la contextualización del registro arqueológico documentado. En su diseño hay que tener en cuenta los siguientes aspectos: sus características intrínse-

cas, su distribución y, en tercer lugar, su realización.(Chapa Brunet, Uriarte González, Vincent García, Mayoral Herrera, & Pereira Sieso, 2003, p. 7) se plantea la asociación de cada una de las variables necesarias para realizar un buen trabajo o diagnóstico arqueológico.

Es importante resaltar que el uso de herramientas tecnológicas permite elaborar informes cada vez más complejos los cuales utilizan elementos geográficos anudados con elementos alfanuméricos, esta interacción permite un mayor análisis como lo muestra la (Figura 4).

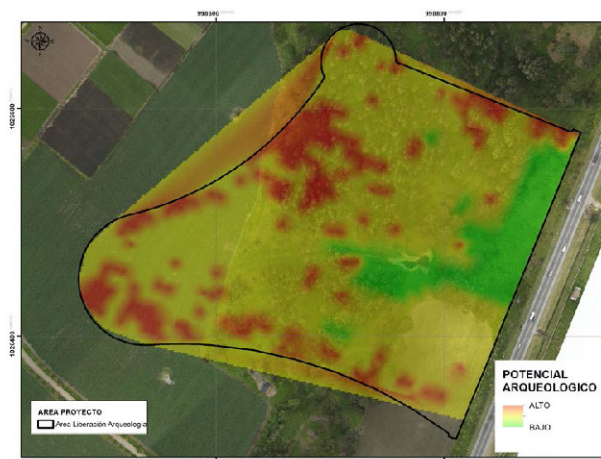


Figura 4 Potencial arqueológico prospección arqueológica en el Noviciado Cota. (Jorge Huertas, 2015)

Esto se obtiene mediante un proceso realizado a la información vinculada a cada uno de los puntos tomados en la fase de campo en la cual al asignarle un valor numérico al resultado de los puntos (negativo, positivo, descartado) de la prospección luego por medio de un algoritmo de interpolación llamado el vecino natural se obtiene un producto raster. Este producto es la distribución de cada uno de los puntos de la prospección; Seguido a esto se obtienen polígonos de cada una de las áreas que determinan el potencial arqueológico. De esta manera, el uso de herramientas SIG permite calcular áreas y tomar determinaciones para el establecimiento de zonas de rescate o monitoreo arqueológico.

### IV. CONCLUSIONES

Con la información recogida en campo relacionada a las características del terreno, el paisaje y a la caracterización de las posibles áreas con evidencias culturales. Se procedió a la integración de la información consignada en bases de datos espaciales. Estas bases contienen elementos geográficos asociados a cada uno de los pozos de sondeo que a su vez cuentan con la información alfanumérica; esto es lo que se denomina un sistema de información geográfico y todo con el fin de realizar el análisis de cada una de las variables consignadas en la ficha de registro, como es la textura del suelo, profundidad, color, tipo de horizonte, sondeos descartados, negativos y positivos. Producto de la obtención de estas variables, se adquieren datos concretos sobre la estructura y composición de los sitios arqueológicos o de aquellas áreas que no se presentan evidencias culturales. Generando de esta forma, una perspectiva del terreno y del paisaje que ayudan a la comprensión de la disposición de las evidencias arqueológicas en el espacio y el territorio, logrando establecer patrones en el uso y ocupación del paisaje por los grupos humanos en tiempos pasados, pero también obtener información sobre trayectorias socioculturales actuales.



**Anexo 1.**

Ficha información arqueológica

FICHA DE PROSPECCION ARQUEOLOGICA																																																																																															
PROYECTO																																																																																															
UNIDAD FUNCIONAL																																																																																															
MUNICIPIO																																																																																															
VEREDA																																																																																															
PREDIO																																																																																															
FECHA																																																																																															
POZO DE SONDEO																																																																																															
RESULTADO																																																																																															
POSITIVO									NEGATIVO									DESCARTADO																																																																													
HORIZONTE							A							AB							B							C																																																																			
PROFUNDIDAD																																																																																															
COLOR																																																																																															
HUMEDAD							A							M							B							A							M							B																																																					
GRANO																																																																																															
A							G							M							F							A							G							M							F							A							G							M							F																		
TEXTURA																																																																																															
A				Ar				L				AAr				AL				LAr				A				Ar				L				AAr				AL				LAr				A				Ar				L				AAr				AL				LAr																											
BIOTURBACIÓN																																																																																															
RF				RG				Lb				H				Lv				Bu				Md				Ot				RF				RG				Lb				H				Lv				Bu				Md				Ot				RF				RG				Lb				H				Lv				Bu				Md				Ot			
MOTEADO																																																																																															
DATOS DE RECUPERACION DE MATERIALES																																																																																															
NIVEL							CERAMICA							LITICO							CARBON							OTROS							ROTULO BOLSA																																																												
1. (0 - 10 cm)																																																																																															
2. (10 -20 cm)																																																																																															
3. (20 -30 cm)																																																																																															
4. (30 -40 cm)																																																																																															
5. (40 -50 cm)																																																																																															
6. (50 -60 cm)																																																																																															
7. (60 -70 cm)																																																																																															
8. (70 -80 cm)																																																																																															
Observación General																																																																																															
UNIDAD FISIOGRAFICA																																																																																															

**AGRADECIMIENTOS**

Antropólogo Jorge Huertas  
 Antropólogo Edwin Varela  
 Consorcio OHL

**REFERENCIAS**

Amado Reino, X. (1997). La aplicación del GPS a la Arqueología. Trabajos de prehistoria, 54(1), 155-165.

Araneda, E. (2002). Uso de Sistemas de Información Geográficos y análisis espacial en arqueología: Proyecciones y limitaciones. Estudios atacameños, (22), 59-75.

Arroyo-Bishop, D. (1991). El sistema ArchéoDATA: hacia la creación de un Sistema de Información Arqueológica. Complutum, (1), 167-174.

Chapa Brunet, T., Uriarte González, A., Vincent García, J. M., Mayoral Herrera, V., & Pereira Sieso, J. (2003). Propuesta metodológica para una prospección arqueológica sistemática: el caso del Guadiana Menor (Jaén, España). Trabajos de prehistoria, 60(1), 11-34.

Fernández, I. F. (2001). Usos de un SIG, Sistema de Información Geográfico, en la construcción de una planimetría arqueológica para Tarragona (I). Revista d'arqueologia de Ponent, 111-121.

Jorge Huertas. (2015). Formulación del plan de manejo arqueológico para las obras en zonas de sesiones públicas en la hacienda el noviciado, vereda moya, municipio de Cota. Departamento de Cundinamarca.

Mayoral Herrera, V., Cerrillo Cuenca, E., & Celestino Pérez, S. (2009). Métodos de prospección arqueológica intensiva en el marco de un proyecto regional: el caso de la comarca de La Serena (Badajoz). Trabajos de prehistoria, 66(1), 7-26.

San Miguel Mate, L. C. (1992). El planteamiento y el análisis del desarrollo de la prospección: dos capítulos olvidados en los trabajos de arqueología territorial. Trabajos de prehistoria, 49, 35-49.





En Iberoamérica la más importante cita tecnológica - científica en el ámbito de las ciencias geográficas se realiza a través de la Conferencia Iberoamericana de Sistemas de Información Geográfica (CONFIBSIG).

El objetivo fundamental de la CONFIBSIG es conocer, discutir, aprender y difundir los avances científicos en temas de tecnología de la información geográfica, sistemas de información geográfica y sus múltiples aplicaciones.

La primera cita (I-CONFIBSIG), se realizó en el año 1987 en Costa Rica con el nombre de "Primera Conferencia Latinoamericana de Información en Geografía, a partir de la cual, cada dos años, se desarrollan periódicamente las conferencias en distintos países de Iberoamérica.

Venezuela fue la sede en (1989 y 1999), Chile (1991 y 2015), Brasil (1993 y 2001), Argentina (1995 y 2007), Perú (1997), España (2003), Puerto Rico (2005), Costa Rica (2009), México (2011), Honduras (2013) y Ecuador (2017).

La ciudad de Cuenca en el Ecuador es la sede de la XVI CONFIBSIG con la Universidad del Azuay como anfitriona, en la que cuenta con participantes oriundos de diez países.

En la XVI CONFIBSIG se presentan los resultados de trabajos de investigación organizados en siete ejes temáticos:

- E-1 Formación y enseñanza en Tecnologías de la Información Geográfica.
- E-2 Recursos naturales, ambiente y cambio climático.
- E-3 Salud y seguridad alimentaria.
- E-4 Infraestructura de datos espaciales.
- E-5 Cartografía, catastro y Sistemas de Información Geográfica Municipales.
- E-6 Gestión y ordenamiento territorial.
- E-7 Métodos y análisis con Tecnologías de la Información Geográfica.

ISBN: 978-9978-325-87-2



Puede descargar la versión digital de este documento (con gráficos a color) y más información del evento en:

[www.CONFIBSIG.ec](http://www.CONFIBSIG.ec)