

A detailed satellite with solar panels and a parabolic antenna is shown in the upper left corner, set against a deep blue space background with faint stars and a network of glowing lines.

# Análisis Geográficos

REVISTA DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI

Número 52 pp. 1-180, 2017. Bogotá, Colombia. ISSN. 0120-8551

## INFORMACIÓN GEOESPACIAL PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA PAZ

**IGAC**  
INSTITUTO GEOGRÁFICO  
AGUSTÍN CODAZZI



**TODOS POR UN  
NUEVO PAÍS**  
PAZ · EQUIDAD · EDUCACIÓN





# Análisis Geográficos

REVISTA DEL INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI

Número 52, 180 p., Bogotá, Colombia, 2017

■ JUAN MANUEL SANTOS CALDERÓN

Presidente de la República de Colombia

■ ÓSCAR NARANJO

Vicepresidente de la República de Colombia

■ JUAN ANTONIO NIETO ESCALANTE

Director General Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)

## CONSEJO DIRECTIVO

■ Dr. MAURICIO PERFETTI DEL CORRAL

Director General del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)  
Presidente del Consejo Directivo

■ Dr. LUIS FERNANDO MEJÍA

Director General del Departamento Nacional de Planeación (DNP)

■ Dr. LUIS CARLOS VILLEGAS ECHEVERRI

Ministro de Defensa Nacional

■ Dr. LUIS GILBERTO MURILLO

Ministro de Ambiente y Desarrollo Sostenible

■ Dr. AURELIO IRAGORRI VALENCIA

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural

■ Dr. EDGAR MONCAYO JIMÉNEZ

Representante de la Presidencia de la República

■ Dr. JUAN ANTONIO NIETO ESCALANTE

Director General del Instituto Geográfico Agustín Codazzi

■ Dra. DIANA PATRICIA RÍOS GARCÍA

Secretaria General del Instituto Geográfico Agustín Codazzi

## COMITÉ EDITORIAL

- **Juan Antonio Nieto Escalante**  
Director General
- **Diana Patricia Ríos García**  
Secretaria General
- **Marco Tulio Herrera Sánchez**  
Subdirector de Geografía y Cartografía
- **Germán Darío Álvarez**  
Subdirector de Agrología
- **Leidy Yadira Escamilla Triana**  
Subdirectora de Catastro

- **Andrea del Pilar Moreno Hernández**  
Jefe Oficina Asesora de Planeación
- **Héctor Mauricio Ramírez Daza**  
Jefe de la Oficina Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF)
- **Paola Méndez Hernández**  
Jefe Oficina de Difusión y Mercadeo
- **Gloria Maribel Torres Ramírez**  
Asesora de Comunicaciones

## EDITORES

- **Juan Antonio Nieto Escalante**  
Director General
- **Héctor Mauricio Ramírez Daza**  
Jefe de la Oficina Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF)

- **Luis Carvajal Celemín**  
Asesor Dirección General
- **Jonás C. León P.**  
Editor

## COMITÉ CIENTÍFICO

- **MSc. Héctor Mauricio Ramírez Daza**  
Jefe de la Oficina Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF)
- **MSc. Elena Posada**  
Coordinadora Grupo de Fomento y Gestión del Conocimiento en Geomática
- **MSc. Fredy Alberto Gutierrez Garcia**  
Coordinador Grupo Infraestructura de Datos Espaciales y Gestión de la Información Geográfica
- **MSc. Jaime Silva Herrera**  
Grupo Fomento y Gestión del Conocimiento en Geomática
- **MSc. Yesenia Vargas Tejedor**  
Grupo Fomento y Gestión del Conocimiento en Geomática
- **Ing. Oswaldo Gilberto Ibarra Ortiz**  
Grupo Infraestructura de Datos Espaciales y Gestión de la Información Geográfica

## DISEÑO Y DIAGRAMACIÓN

- **Juan Pablo Mahecha Sierra**  
Diseñador gráfico. Oficina Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF)
- **Alba Esperanza Giraldo Vásquez**  
Oficina Difusión y Mercadeo de la información

## CORRECCIÓN DE ESTILO

- **Luz Ángela Uscátegui Cuellar**  
Correctora de estilo. Oficina Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF)
- **Víctor Hugo Vásquez Vásquez**  
Oficina Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF)



## NOTA DEL EDITOR

Los artículos que se publican en el número 52 de la revista *Análisis Geográficos* fueron presentados en la Semana Geomática 2015 y seleccionados por su valor temático, además de cumplir con la mayor parte de las indicaciones para la presentación de documentos en extenso.

Sin embargo, cabe aclarar que los artículos referidos se prepararon respetando los originales enviados por los autores, salvo adecuaciones a las normas editoriales.

En consecuencia, la responsabilidad de los contenidos y las imágenes empleadas es exclusivamente de los autores y no comprometen al Comité Editorial ni al editor de la revista.

De los artículos aceptados en la revista *Análisis Geográficos*, se entenderá que su autor o autores le ceden a esta los derechos patrimoniales para su publicación en cualquier forma o medio (análogo o digital).

*Instituto Geográfico Agustín Codazzi*

*Análisis Geográficos: Información geoespacial para la construcción de la paz / El Instituto. - Bogotá: No. 52, 2017 180 p., ilustraciones, mapas a colores, cuadros (documento electrónico).*

*Incluye referencias bibliográficas*

*Texto bilingüe: español - inglés*

*ISSN impreso 0120-8551*

*ISSN electrónico en trámite*

1. Planificación Regional 2. Ordenamiento Territorial - Colombia 3. Catastro 4. Adjudicación de Tierras 5. Infraestructura de Datos Espaciales (ICDE) 6. Percepción Remota 7. Georreferenciación 8. Fotogrametría Aérea 9. Sensores Remotos - Congresos, Conferencias, etc. 10. Imágenes Satelitales - Colombia 11. Imágenes Ópticas 12. Redes Neuronales (Computadores) 13. Cáncer Gástrico - Colombia - Estadísticas 14. Investigación Científica

## POLÍTICA DE ACCESO ABIERTO

Esta revista proporciona un acceso abierto a su contenido, basado en el principio de que ofrecer al público un acceso libre a las investigaciones ayuda a un mayor intercambio global del conocimiento.

Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons [Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).



colombia.igac



@IGACColombia



theIGACTv



## TABLA DE CONTENIDO

## TABLE OF CONTENTS

### Conferencias Magistrales

### Keynotes

**11**

Juan Antonio Nieto Escalante

80 años de aportes al desarrollo del país y de contribuciones a la construcción de la paz

**11**

*80 years of contributions to the development of Colombia and the construction of peace*

**17**

Laurent Polidori

Aportes de la percepción remota para construir la paz con desarrollo sostenible: éxitos y limitaciones en los últimos 25 años

**17**

*Contributions from Remote Sensing technologies in the construction of peace and sustainable development: successes and limitations in the last 25 years*

### Planificación Territorial y Catastro

### Land Planning and Cadaster

**35**

Edwin Robert Pérez Carvajal

Ingeniería para el diseño de territorios

**35**

*Territory design engineering.*

**53**

Ivonne Moreno Horta

Un sistema de administración de tierras flexible con enfoque al ciudadano

**53**

*A flexible land administration system focusing citizen*

### Infraestructura de Datos Espaciales

### Spatial Data Infrastructures

**63**

Luis M. Vilches-Blázquez y Julián Mauricio Alvarado Torres

Conduciendo la información estadística georreferenciada del dane a otra dimensión.

**63**

*Leading to DANE's georeferenced statistic information to other dimension.*



## Percepción Remota

## Remote Sensing

**75**

Jorge Luis Rodríguez e Iván Lizarazo

Obtención de información multiespacial georreferenciada de especies vegetales del Jardín Botánico de Bogotá mediante un sistema aéreo no tripulado

**75**

*Multispectral georeferenced information acquisition of vegetable species from Bogotá Botanic Garden using a unmanned aerial system*

**91**

Fabio H. Echeverry Andrade

Identificación de los efectos del estrés hídrico en cultivos de algodón por medio de sensores remotos

**91**

*Identification of water stress effects on cotton crops using Remote Sensing*

**107**

Gabriela Lucia Chamorro Yela  
y Francisco Luis Hernández Torres

Detección de nubes apartir de redes neuronales perceptron multicapa en imágenes Landsat

**107**

*Cloud detection from multilayer perception neural networks on Landsat images*

**125**

David Montero Loaiza y Francisco Luis Hernández Torres

Evaluación del estado de crecimiento de la vegetación por medio de imágenes de radar y ópticas

**125**

*Rating of vegetation growth state using Radar and optical images*

## Geodesia

## Geodesy

**143**

Héctor Mora-Páez

Geodesia espacial en la gestión del riesgo: aplicaciones actuales y futuras en Colombia

**143**

*Spatial Geodesy in risk management: current and future applications in Colombia*

## Sistemas de Información Geográfica

## Geographic Information Systems

**155**

Francisco Javier Sarmiento Parra, Cristhian Eduardo Murcia Galeano, Luis Fernando Santa Guzmán y Luis Fernando Gómez Rodríguez

Modelos de regresión espacial para describir el comportamiento del cáncer gástrico en Colombia para el periodo 2005-2012

**155**

*Spatial regresión models to describe gastric cancer behavior in Colombia 2005-2012*



## **PRESENTACIÓN**

**E**n Colombia se respira un nuevo aire: el de la paz. Este es un hecho histórico que genera un ambiente propicio para que todos unidos podamos construir la paz con desarrollo sostenible, que da sentido a la propia vida. Ese es el reto que tenemos como generación.

Las nuevas generaciones juzgarán a sus gobernantes por la actitud que asumieron para consolidar la paz y juzgarán a sus científicos, investigadores y académicos por lo que hicieron en las ciencias, en las artes, en las humanidades y en la docencia para ponerlas al servicio de la sociedad, que hoy más que nunca necesita de sus aportes reales, tangibles y operativos.

El Instituto Geográfico Agustín Codazzi, por su parte, ha trabajado incansablemente durante más de ochenta años cumpliendo con su misión y su visión en los campos de la geografía, la cartografía, el catastro, el estudio de los suelos y la transferencia de conocimientos, buscando siempre el beneficio de la ciencia y el mejoramiento de la calidad de vida de los colombianos. Así, por ejemplo, en el desarrollo de las tres últimas versiones de la Semana Geomática Internacional, que organiza el IGAC desde 2005, analiza el uso de las ciencias y tecnologías geoespaciales para el estudio de los recursos naturales y el medioambiente. Por este motivo, nuestros lemas fueron: “Información satelital al servicio del desarrollo territorial” (2011), “Tecnologías geoespaciales para el ordenamiento y gestión del territorio” (2013) e “Información geoespacial para la construcción de la paz” (2015). Todos ellos privilegian sus aplicaciones a las soluciones de los problemas de nuestro país.

Una parte importante de las actividades del IGAC se orienta a la divulgación de sus investigaciones y de los productos de este tipo de certámenes. En consecuencia, en el presente número de la revista Análisis Geográficos, el primero en formato digital,



se presentan temas como los aportes del IGAC al desarrollo del país y su contribución durante más de ochenta años, y los aportes de la percepción remota, este último, escrito por Laurent Polidori, un profesor francés que regresó a nuestro Instituto y a Colombia después de veinticinco años.

En el área de la planeación territorial y el catastro se presentan dos trabajos: el primero enfatiza en el papel de la ingeniería para la construcción de territorios que propicien el desarrollo humano sostenible, y el segundo se refiere a un sistema de administración de tierras flexible que tenga como centro al ciudadano. En la sección de las infraestructuras de datos espaciales se analiza la integración e interoperabilidad semántica de los datos georreferenciados, explotando las potencialidades de la web.

En el ámbito de la percepción remota, se tratan temas relacionados: i) con la obtención de información multiespectral georreferenciada usando un sistema aéreo no tripulado; ii) la identificación de los efectos del estrés hídrico en los cultivos por medio de sensores remotos y la evaluación del estado de crecimiento de la vegetación por medio de imágenes de radar y iii) la detección de nubes utilizando redes neuronales artificiales.

En la sección correspondiente, se analiza la importancia de la geodesia espacial en la gestión del riesgo y, finalmente, en el ámbito de los sistemas de información geográfica se propone un modelo de regresión espacial para describir el comportamiento del cáncer gástrico en Colombia.

Esperamos que esta publicación, que ponemos a consideración de la comunidad científica, tecnológica, académica y del sector productivo, sirva como un espacio para el debate constructivo, buscando siempre el bienestar de nuestra población.

***Juan Antonio Nieto Escalante***

Director General

*Instituto Geográfico Agustín Codazzi*



# INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI

**IGAC**  
INSTITUTO GEOGRÁFICO  
AGUSTÍN CODAZZI



**TODOS POR UN  
NUEVO PAÍS**  
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN

Información  
**agrológica, catastral,  
geográfica** y de **datos  
espaciales** al servicio de la  
construcción de un **nuevo país**

Visítanos en: [www.igac.gov.co](http://www.igac.gov.co)



IgacColombia



TheIGACTV



@IgacColombia



## 80 años de aportes al desarrollo del país y de contribuciones a la construcción de la paz<sup>1</sup>

*80 years of contributions to the development of Colombia and the construction of peace*

Juan Antonio Nieto Escalante<sup>2</sup>

“Cómo citar este artículo: Nieto Escalante, J. A. (2017). 80 años de aportes al desarrollo del país y de contribuciones a la construcción de la paz. *Análisis Geográficos*, 52, 11-16.

Esta Semana Geomática tiene una característica muy especial frente a los eventos que hemos celebrado en años anteriores: primero, se cumplen 80 años de la fundación del Instituto Geográfico Agustín Codazzi; segundo, el país se dirige hacia un pacto de paz, donde uno de los principales acuerdos gira alrededor de la cuestión rural; tercero, culmina el primer año del segundo mandato del presidente Santos; cuarto, se inicia la ejecución de un nuevo Plan Nacional de Desarrollo, donde hay unos artículos y unos objetivos que tocan de manera clara y contundente la labor que el Instituto desempeña, y quinto, se presenta un interés muy importante por la gestión del territorio, sobre todo en lo rural y lo regional.

Aprovecho esta ocasión para hacer un inventario de nuestras realizaciones y para reconocer el talento humano que el Instituto ha venido formando, a lo largo de estos años, sobre los temas de agrología, geografía, cartografía, catastro y conocimiento geoespacial, como parte de la misión institucional.

A lo largo de nuestra historia hemos desarrollado numerosas investigaciones que nos permiten disponer en la actualidad de un conocimiento detallado acerca de nuestros suelos, sus patrones de distribución en el territorio nacional y su capacidad de uso. Esta experticia es ampliamente reconocida en América Latina, y en consecuencia hemos podido apoyar a gobiernos de otros países en el desarrollo de trabajos similares. La información disponible, conformada por estudios a escala 1:100.000 para todo el país, discriminados por departamentos, y a escalas detalladas para el 25% del territorio nacional, incluyendo nuestros páramos y humedales, constituye un activo de la más alta significancia, y un apoyo insustituible para la formulación de políticas de manejo y aprovechamiento sostenible del suelo y para la planificación del desarrollo agrícola, pecuario, forestal y ambiental, así como también para soportar la formulación de planes de ordenamiento del territorio e implementación de actividades y proyectos de conservación de la naturaleza.

<sup>1</sup> Texto de la conferencia magistral dictada en el marco de la Semana Geomática 2015, organizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

<sup>2</sup> Director General del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Bogotá, Colombia. Correo: [juan.nieto@igac.gov.co](mailto:juan.nieto@igac.gov.co).



El IGAC cuenta con el Laboratorio Nacional de Suelos, en donde cada año procesamos más de veinticinco mil paquetes analíticos en materia de química, física, mineralogía, micromorfología, biología de suelos y aguas y tejidos vegetales, y se hacen diversas investigaciones sobre las posibilidades para su manejo tecnificado.

Recientemente, el Ministerio de Cultura le otorgó al Museo Nacional de Geografía y Cartografía su calidad de tal, y pretendemos hacer lo mismo con el Museo Nacional de Suelos, que se inauguró en el 2005 con una colección de 79 monolitos de suelos representativos de diferentes regiones del país.

A partir de la Comisión Corográfica, hito de la ciencia geográfica en Colombia, hemos mejorado, a través de nuevas tecnologías y nuevos estudios, la cartografía básica del país: a escala 1:500.000 se cuenta con el mapa digital integrado, elaborado a partir de procesos de generalización de bases cartográficas existentes; a escala 1:100.000 se dispone del ciento por ciento del territorio nacional en formato digital, con 600 planchas; a escala 1:25.000 se tiene una cobertura del 25% del territorio nacional y a escala 1:2000 existe información para la gran mayoría de las cabeceras municipales.

El IGAC cuenta con ortoimágenes y espaciomaps elaborados con imágenes satelitales a escala 1:100.000 de diferentes zonas del país, y ortofotos de la mayoría de las cabeceras municipales a escala 1:2000. También dispone, como activo construido a través de estos 80 años, con un portal de mapas de Colombia, ortorectificados y georreferenciados con información planimétrica y diversos atributos, para

realizar mediciones de precisión, y más de ochenta mil imágenes de satélite y aerofotografías debidamente catalogadas en el Banco Nacional de Imágenes, que es de libre consulta y está a permanente disposición de los usuarios.

Debemos destacar el acopio de información relacionada con las aerofotografías históricas de un gran número de regiones del país, en especial de los centros urbanos, tomadas desde 1935 y que, sin duda, son un activo valioso. Se trata de un patrimonio histórico y una base para estudios multitemporales sobre los fenómenos urbanos que nos permite analizar la dinámica de estos.

La entidad ha realizado también, a lo largo de 80 años, trabajos especializados que se han constituido en hitos, como la cartografía para el censo de población del 2005 y para el censo agropecuario del 2014. En el primer caso, con 37.000 planchas impresas, 52.000 archivos digitales, identificadores de manzanas para 750 cabeceras municipales en formato análogo y 180 en formato digital, ortofotomosaicos y ortofotomaps para 138 cabeceras urbanas, cartografía básica y catastral para 294 cabeceras y 18.076 metadatos geográficos. En el caso del censo agropecuario, hicimos un trabajo conjunto similar, con una enorme producción de material.

Contamos con estudios geográficos que esperamos fortalecer, pues se ha disminuido el presupuesto de manera ostensible en los últimos años. Tenemos numerosos estudios geográficos elaborados y publicados durante estos 80 años. Mencionaré algunos: el *Atlas básico de Colombia*, que puso por primera vez al alcance de la población escolar un documento



global sobre las características del país; las hojas de ruta y las guías turísticas; el mapa oficial de la república de Colombia y el *Diccionario geográfico*. Hay estudios, que denominamos *excepcionales*, con investigaciones geográficas y geofísicas sin precedentes, como el plano de Bogotá a escala 1:2000 para el Plan Maestro de Acueducto y Alcantarillado; la localización de las estaciones del ferrocarril del Atlántico; el primer mapa ecológico basado en las zonas de vida o de Holdridge y los Planes de Desarrollo Urbano para Cartagena, Ibagué, Pereira, Valledupar, Girardot, Pasto, Tuluá y, recientemente, la *Geografía de la población de Colombia*.

Otra de las tareas a cargo es la delimitación técnica de las fronteras y los deslindes. Parte de la definición de los mapas oficiales de la república es la demarcación de fronteras nacionales en asocio con la Cancillería; tenemos además la competencia respecto a la situación de conflicto de límites que se presentan entre departamentos y entre municipios.

Un tema que toma cada vez más importancia en el país es el ordenamiento territorial. Hacemos parte de la Comisión de Ordenamiento Territorial (COT) del país y de las comisiones regionales respectivas. El Instituto ha fortalecido su acervo técnico desde las primeras metodologías que se plantearon a partir de la Ley 388 de 1997, muy consultadas por especialistas en esta materia. Nos aprestamos a proponer una metodología para revisión de los Planes de Ordenamiento Territorial, en asocio con otras agencias del Estado, en el marco de la COT Nacional.

El IGAC dispone del Sistema de Información Geográfica para el Ordenamiento

Territorial (Sigot), que maneja información local y departamental con más de seiscientas variables, y el Sistema de Información Geográfica para Áreas de Reglamentación Especial (Sigare), al servicio de los planificadores de proyectos estratégicos de infraestructura y de los grandes inversionistas privados, para que tengan información de primera mano y de manera muy rápida. Estamos consolidando estos dos sistemas y se espera poder entregarlos integrados al Portal Geográfico Nacional, al que nos vamos a referir más adelante.

Del acervo bibliográfico de estudios técnicos realizados durante estos 80 años, que están disponibles en la biblioteca, vale recordar, por ejemplo, la caracterización del desarrollo territorial regional, donde hemos tomado como caso piloto al Valle del Cauca, Cauca y Nariño; el esquema de ordenamiento territorial del municipio de Bojayá y los expedientes urbanos de Zipaquirá y Honda, entre muchos otros activos que hacen parte de ese acervo bibliográfico. Algunas obras didácticas que el Instituto ha producido son *Geografía para niños* y *Suelos para niños*, con un recorrido temático desde los conceptos básicos, destinados a hacer conciencia en las mentes infantiles sobre las características de este recurso.

Los activos en materia de tecnologías geoespaciales están representados en tres grandes pilares: uno, la percepción remota; dos, los sistemas de información geográfica, y tres, la infraestructura de datos espaciales. Quisiera destacar el diseño y la puesta en marcha de numerosos sistemas de información geográfica que hoy son utilizados por las entidades públicas y privadas del país, e incluso en



el exterior. Contamos también con un curso académico de Doctorado en Geografía, que se dicta mediante una alianza con la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.

El Catastro es uno de los más valiosos activos que tiene la organización en beneficio del país. Se concreta, de manera breve, en información sobre más de 10,2 millones de predios que tiene bajo su responsabilidad el IGAC, de un total de 15,5 millones de predios, incluyendo los catastros descentralizados de Cali, Antioquia, Medellín y Bogotá. Estas cifras contrastan con el millón de predios que se registraron en el país en 1937, según reporte del Ministerio de Hacienda de esa época. Estos datos pueden parecer fríos, pero quienes conocen sobre la materia saben del enorme esfuerzo que ha representado, durante estos 80 años, adelantar esa identificación catastral, que permite la identificación física, jurídica, fiscal y económica de los bienes inmuebles. Es, además, una información básica para determinar la contribución del impuesto predial, pues este tributo constituye el principal ingreso en el presupuesto de más del 60% de los municipios del país.

Este Catastro nos ha permitido, anticipándonos a la noción del catastro multipropósito, presentar el *Atlas de la distribución de la propiedad rural en Colombia* y también apoyar la política de tierras. Con base en la información de los procesos de restitución de tierras, prelude de la construcción del nuevo país, hemos venido trabajando con la Unidad de Restitución de Tierras y con el Ministerio de Agricultura y Planeación Nacional.

Otros activos valiosos se refieren al

equipamiento físico y técnico del Instituto, es decir, inmuebles y dotaciones tecnológicas. Hemos hecho una inversión bastante importante que apunta a mejorar la calidad técnica del Instituto, con dotaciones tecnológicas en la Sede Central, en las 22 direcciones territoriales y en las unidades operativas, tendientes a lograr el objetivo que enmarca el título de la sexta Semana Geomática, la construcción de la paz, que simboliza la arquitectura de un nuevo país sobre dos pilares: uno, la solución pacífica de los conflictos, que no la ausencia de conflictos, y dos, la promoción de un desarrollo que conduzca a más elevados niveles de bienestar y justicia para los residentes en el territorio nacional.

En este sentido, ¿cuáles son los aportes a la paz del IGAC? Respecto al Catastro, mejorar y permitir el fortalecimiento de los fiscos municipales, evitar o resolver con solvencia conflictos entre propietarios de predios, contribuir a la seguridad jurídica y fundamentar una mejor planeación; en materia de agrología, apoyar, con la información sobre la vocación y el uso de los suelos, la planeación productiva en condiciones sostenibles, la detección temprana de riesgos y la adecuada restitución de tierras; en materia de cartografía, suministrar este elemento esencial para el ordenamiento del territorio y la planeación en todas las dimensiones y, en materia de geografía, por su propia definición, ofrecer un conocimiento integral del territorio. Por último, pero no menos importante, la investigación y la aplicación de tecnologías geoespaciales que facilitan y amplían los conocimientos del territorio.

Estos 80 años nos reciben con unas dificultades económicas muy importantes,

pero también con una intención de modernizar la entidad, particularmente el Catastro. En este sentido, se está pensando en hacer realidad los conceptos planteados en el Plan de Desarrollo sobre el carácter multipropósito de este. Trabajamos en un documento Conpes para tal fin. Valga anotar que involucramos todas las áreas misionales. Dentro de este espíritu, nos preguntamos sobre la nueva institucionalidad para el IGAC.

Hay necesidad de cambios, por supuesto. En el caso del Catastro, los cambios se orientan a hacer realidad el concepto multipropósito que, durante muchos años, se venía discutiendo. Tenemos la intención de hacerlo realidad de tal forma que se tengan en cuenta no solo variables de carácter fiscal, sino otras más que nos van a permitir identificar de mejor forma el territorio y llevar a cabo los cambios para la seguridad jurídica de los predios, sobre todo con la transformación de la relación entre el catastro y el registro. Para nadie es un secreto que hay un divorcio entre las fichas catastrales y las registrales por las diferencias en los linderos. Se trata de definir ese nuevo concepto, y respetar el tema de cabida y linderos alrededor de los predios que se van a identificar, que se van a regular, y conocer mejor las formas de tenencia de la tierra. Ello implica también trabajar para la actualización permanente. Esos son retos a afrontar, además de dilucidar la financiación de esta operación.

En materia de agrología, los cambios deberán venir de mejores y permanentes estudios semidetallados y detallados de suelos, la introducción de nuevas herramientas tecnológicas y, por supuesto, la formación y capacitación del talento

humano. Tenemos una gran cantidad de expertos, de técnicos y demás que ya tienen derecho a una justa pensión.

Cambios en cartografía y geografía: el Plan Nacional de Cartografía, el Portal Geográfico Nacional, como lo mencioné, y los estudios geográficos hacen parte de esos cambios que necesitamos adelantar para poner al Instituto a tono con este inicio de siglo y de milenio. En investigación geoespacial, grandes retos se presentan en la innovación conceptual y técnica y en la formación del talento humano, en la necesidad de contar con alianzas con institutos de educación e investigación en el país y en el exterior y de aprovechar la cooperación internacional.

Otro de los cambios previsto en el Plan Nacional de Desarrollo tiene que ver con la descentralización o la delegación de funciones en materia de catastro a las entidades territoriales, bien sea municipios o departamentos. Nosotros no nos aferramos a la idea de que el IGAC tenga la formación y la conservación del catastro en sus manos. Creemos que las entidades territoriales pueden tener esa delegación, pero conservaremos el carácter de máxima autoridad en materia catastral, agrológica, geográfica y en técnicas geoespaciales.

Con sentido de economías de escala y de rigor técnico, las labores de geodesia, de agrología y de cartografía se deben conservar como actividades supervisadas o hechas directamente por el IGAC, entre otras cosas, porque cuando hablamos de esa supervisión y de autoridad estamos hablando, ni más ni menos, de un tema de soberanía, por lo cual la responsabilidad última no debe estar en manos de privados o de terceros.





No cabe duda de que, tomando en cuenta el interés nacional, las labores de deslindes y la construcción del mapa oficial de la república no pueden ser delegadas porque en ellas predomina ese concepto de soberanía.

En cuanto a la modernización, hemos avanzado en inversiones importantes a lo largo de estos dos años, en especial, en lo que corresponde a mi gestión, en el tema de la dotación y el mejoramiento de la infraestructura. Pero nos falta, y en eso andamos, la renovación de la normatividad y de los marcos metodológicos. En ese sentido, las áreas misionales del Instituto, Cartografía y Geografía, Agrología y Catastro, están trabajando para expedir normas para hacer más pertinente, concisa y certera su acción.

El último tema que quiero compartir es el de la financiación. Pensamos, por

ejemplo, para el tema del catastro, la posibilidad de implementar una sobretasa al predial; también existe la posibilidad de una estampilla inmobiliaria, o la participación en los ingresos por registro.

En conclusión, el Instituto cuenta, gracias a los esfuerzos de muchas personas y de muchos gobiernos, con unos activos muy valiosos en agrología, cartografía, geografía y catastro, y sabemos que es hora, en homenaje a los fundadores, de introducir cambios institucionales y organizacionales importantes.

Debo decir, para terminar, que todo el equipo directivo del Instituto, todos los trabajadores, funcionarios y contratistas tenemos clara nuestra responsabilidad con el futuro de Colombia, con este propósito de paz que estamos empeñados en lograr y que, Dios mediante, nos sentimos *ad portas* de alcanzar.

## Aportes de la percepción remota para construir la paz con desarrollo sostenible: éxitos y limitaciones en los últimos 25 años<sup>1</sup>

*Contributions from Remote Sensing technologies in the construction of peace and sustainable development: successes and limitations in the last 25 years*

Laurent Polidori<sup>2</sup>

“Cómo citar este artículo: Polidori, L. (2017). Aportes de la percepción remota para construir la paz con desarrollo sostenible: éxitos y limitaciones en los últimos 25 años. *Análisis Geográficos*, 52, 17-34.

Quisiera agradecer al Instituto Geográfico Agustín Codazzi y al comité organizador por la invitación, y por haber escogido un título muy estimulante. Podemos pensar que no existe relación entre las técnicas de percepción remota y la paz, y que una conferencia sobre las evoluciones de la percepción remota en los últimos veinticinco años solo va a presentar algoritmos recientes de procesamiento de imágenes. Sin embargo, acepté este título porque existen relaciones entre la percepción remota y la paz. Primero, porque las innovaciones tecnológicas se hacen al ritmo de los ciclos de guerra y paz. Segundo, porque las herramientas geográficas en general y la percepción remota en particular, después de haber sido dedicadas a la descripción del mundo físico, han empezado a interesarse por la sociedad hasta con métodos cuantitativos para finalidades tan importantes como la salud y la paz.

La única parte de este título que yo mismo propuse es la referencia al período de los últimos veinticinco años, porque estuve aquí en Bogotá a finales de los años

ochenta y trabajé en el IGAC y el CIAF durante dos años, así que estoy volviendo después de veinticinco años, y la percepción remota de hoy es diferente de lo que era veinticinco años atrás.

Una de las principales tareas de los geógrafos, desde siempre, es descifrar las escrituras que la naturaleza y la sociedad dejaron en la superficie de la Tierra. Para leer estas escrituras, es preciso tener ojos, y justamente existen sensores para tomar imágenes en todas las escalas y en todas las longitudes de onda (inicialmente la fotografía aérea, y hoy sensores ópticos, térmicos, radar y muchos otros).

Considerando la evolución del conocimiento del territorio en los últimos siglos, hubo inicialmente una cartografía muy limitada en la cual la verdad científica estaba contaminada por leyendas. Además, los mapas eran secretos, no eran publicados: la información geográfica no se compartía, mientras que a finales del siglo XX teníamos una perspectiva por satélite casi gratuita.

<sup>1</sup> Texto de la conferencia magistral dictada el 10 de agosto en el marco de la Semana Geomática 2015, organizada por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi.

<sup>2</sup> Director de la École Supérieure des Géomètres et Topographes y Director del Laboratorio de Géodésie et Géomatique de París, Francia. Correo: laurent.polidori@esgt.cnam.fr.



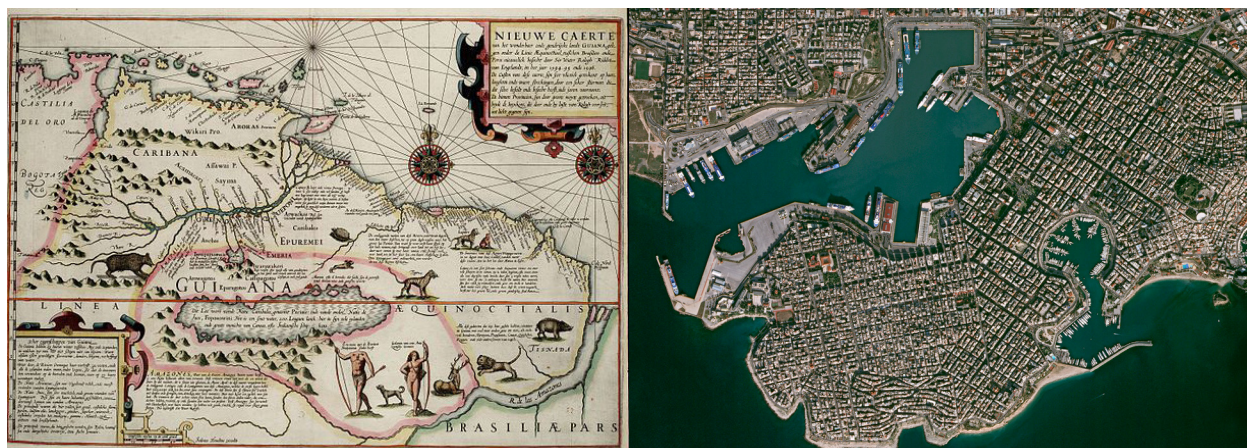


Figura 1. Evolución del conocimiento del territorio en los últimos siglos: a la izquierda, un mapa de la provincia española de Guayana, elaborado por Theodore De Bry en 1599; a la derecha, una imagen satelital de Atenas, Grecia, tomada por Pléiades en el 2011

Fuente: David Rumsey Historical Map Collection (izq.); CNES, Distribution ASV / Spot Image S. A., 2012 (der.).

La evolución de las herramientas geográficas fue siguiendo los avances de la tecnología. Pero no fue una historia lineal y continua, y la historia de las ciencias y técnicas muestra que hubo una época de intenso movimiento con muchas invenciones, y que estas revoluciones intelectuales eran separadas por largos períodos de calma.

Hoy en día, tal vez estamos en el final de una revolución tecnológica que corresponde más o menos a la segunda mitad del siglo XX, y me parece que el anterior período de revolución fue el Renacimiento, es decir, el siglo XVI. Considerando solo los descubrimientos que tuvieron un impacto sobre nuestra actividad como cartógrafos, podemos mencionar:

- La perspectiva, que relaciona las coordenadas 3D de un punto en el espacio con sus coordenadas 2D en un plano de proyección, y el tratado sobre

la perspectiva publicado por el pintor alemán Albrecht Dürer (1471-1528), que puede ser considerado como la base teórica de la fotogrametría.

- El heliocentrismo, que fue la gran idea del astrónomo polaco Nicolás Copérnico (1473-1543), que colocó la Tierra en su posición correcta en el sistema solar.
- El telescopio, que hasta entonces era sólo un juguete: Galileo (1564-1642) fue el primero que lo usó para aplicaciones científicas y fue realmente una revolución para la física, y particularmente para las ciencias geodésicas.
- Otro ejemplo sumamente importante para los cartógrafos es la geometría analítica difundida por Descartes (1596-1650), una geometría que sustituye un punto por sus coordenadas, un objeto por su ecuación y un problema de geometría por un problema de cálculo.



Saliendo de la esfera estrictamente científica, podemos mencionar, también en la época del Renacimiento, la invención de la imprenta, que permite la difusión de los conocimientos, el fin de la época feudal que llevó a reconsiderar el asunto de la propiedad de la tierra, y para los europeos, las grandes expediciones marítimas que empujaron los límites del mundo conocido que debía de ser mapeado.

Después, pocas innovaciones técnicas ocurrieron hasta el fin de la Segunda Guerra Mundial, o sea, hasta la segunda mitad del siglo XX. Considerando de nuevo las invenciones que tuvieron un impacto sobre nuestro trabajo de cartógrafos, la década de 1950 fue una revolución. Aparecieron en pocos años el satélite, el computador, el láser. La transmisión por radio y el radar ya existían y se desarrollaron, así como la aviación había “despegado” durante la Primera Guerra Mundial.

También podemos mencionar invenciones más recientes como el GPS, el internet y la fotografía digital, pero aunque nuevas, tienen sus bases en conceptos de los años cincuenta y sesenta.

Así, si consideramos la historia de la percepción remota por satélite, que es una historia de medio siglo, el aspecto de las imágenes es muy diferente entre la década de 1960 y la década de 2010, pero no ocurrió ninguna revolución tecnológica y los conceptos que están detrás de las imágenes más recientes, ya existían cincuenta años antes.

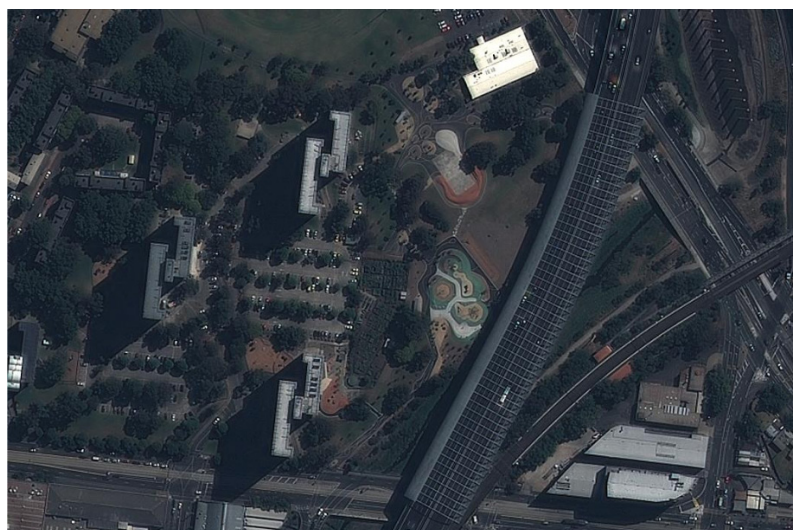
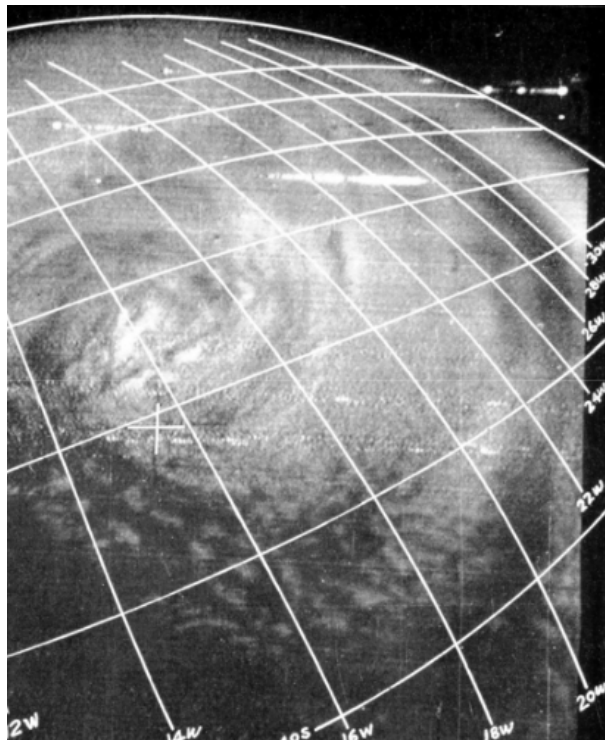


Figura 2. De Tiros a Pléiades: medio siglo de percepción remota por satélite

Fuente: Luque, 2010 (arriba); Astrium GEO-Information Services, 2012 (abajo).



Volviendo al título de esta conferencia, que habla de los últimos veinticinco años, y ahora que dije que no ocurrió nada nuevo en los últimos cincuenta años, ¿será que se acabó la charla? Claro que no, porque en los últimos veinticinco años la industria y la investigación no se quedaron sin hacer nada, la tecnología se desarrolló y su uso se diversificó. Traté de identificar las evoluciones más importantes y les propongo una lista de cinco.

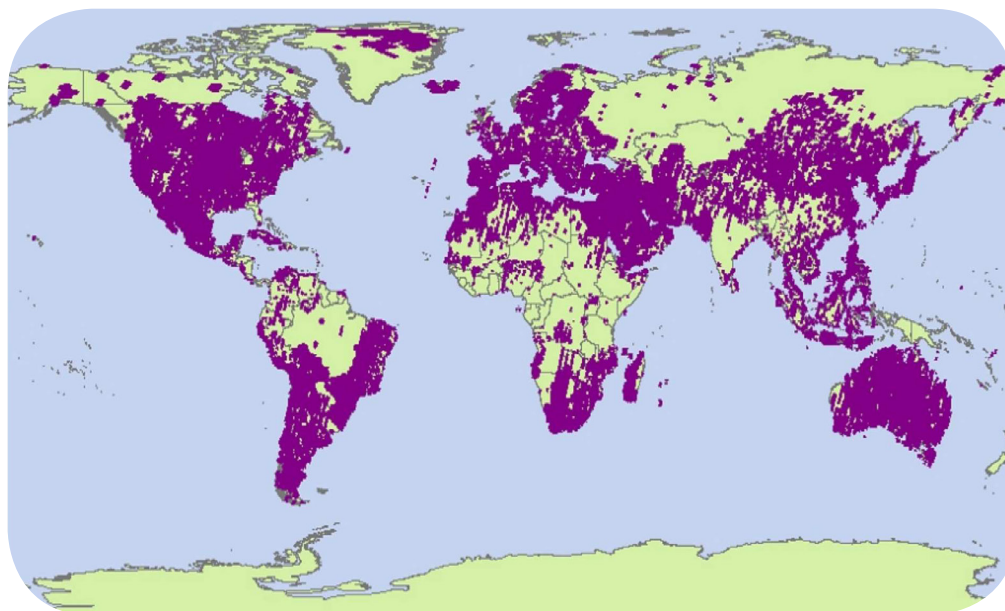
1. Cantidad de datos: en la década de 1990, ya sabíamos bastante del potencial y de las limitaciones de los diferentes tipos de sensores, pero todavía teníamos pocos datos. Un laboratorio de investigación podía tener cinco estudiantes de doctorado trabajando en la misma imagen y se hacía mucho trabajo de campo en la misma área para saber acerca de todo del territorio observado. Dos cosas han

cambiado: más programas de observación de la Tierra por satélite y más oportunidades de acceso a las imágenes.

La consecuencia es que los cinco estudiantes del laboratorio ya tienen diez, cien o mil imágenes para trabajar.

Otra consecuencia es la disponibilidad de series temporales, muy útiles para el estudio de fenómenos dinámicos como la evolución de la cobertura vegetal con índices de vegetación o el monitoreo de deslizamientos por interferometría de radar.

Sin embargo, existen desigualdades en la cobertura mundial, que estadísticamente es menos densa en las regiones tropicales, como se ve en este mapa de la cobertura mundial del satélite SPOT-5 dos años después de su lanzamiento.



**Figura 3.** Mapa de cobertura mundial del satélite SPOT-5

Fuente: U.S. Geological Survey, imágenes SPOT-5, 2004.

La misma desigualdad existe con las imágenes disponibles de forma gratuita en internet. Ya que estas imágenes son financiadas por la publicidad comercial, es claro que tendremos una mejor calidad y una actualización más frecuente de los datos en áreas que ofrecen una mayor oportunidad de publicidad, típicamente aquellas áreas famosas o turísticas.

Inicialmente, estuvimos un poco desorganizados con esta cantidad de datos porque no estábamos preparados. Durante un tiempo, la primera solución que tuvimos para resolver el problema fue aumentar la capacidad de los discos de almacenamiento y la velocidad de los computadores. Finalmente, hace poco tiempo que se introdujo un poco de inteligencia en el proceso, con el concepto de Big Data y el desarrollo de algoritmos de búsqueda más y más poderosos.

Con el aumento de la cantidad de datos, hubiéramos podido pensar que el modelo económico de la percepción remota cambiaría (el modelo económico, o sea la manera de financiar el costo del sistema). Por ejemplo, el sistema Landsat, que había demostrado su capacidad de observación del medio ambiente, fue presentado a partir del Landsat-5 como un sistema comercial, que debía financiarse vendiendo las imágenes. Eso fue hace treinta años. Pero, en realidad, la mayor parte de las imágenes fueron compradas con presupuestos públicos, y hasta ahora una realidad que no ha cambiado es que

los sistemas espaciales de observación de la Tierra son financiados por agencias públicas, o sea por los gobiernos.

2. La segunda evolución es el desarrollo de nuevas soluciones de adquisición de datos, y quisiera mencionar dos casos, dos grupos de soluciones.

El primer caso es el encuentro de sensores existentes con plataformas existentes (mejor dicho, plataformas o vehículos que no habían sido usados para percepción remota todavía, o tal vez en experiencias muy limitadas). Por ejemplo, los vehículos aéreos no tripulados (drones) y los vehículos terrestres (carros) en los cuales fue relativamente fácil colocar sensores para ofrecer imágenes con perspectivas nuevas. En el caso de las plataformas satelitales, la industria estuvo vacilando entre dos estrategias de concepción. Por un lado, plataformas pesadas y caras, por ejemplo el satélite europeo Envisat, del peso y del tamaño de un autobús, que funcionó hasta el año pasado llevando a bordo más de diez sensores científicos diferentes, y por otro lado, plataformas pequeñas y especializadas, más baratas, como los satélites que fueron lanzados a partir de la década del 2000 con sensores de alta resolución.

El segundo caso es el mejoramiento de sensores existentes para hacerlos más adecuados a las necesidades de las aplicaciones, y quisiera ilustrarlo con el ejemplo del desarrollo de capacidades estereoscópicas.







**Figura 4.** Nuevas posibilidades estereoscópicas en la década del 2000: a la izquierda, fotogrametría *along track* con dos cámaras (SPOT-5 / HRS); a la derecha, interferometría con dos antenas (SRTM).

Fuente: Infoterra SGSA, 2016 (der.); National Aeronautics and Space Administration (NASA), 2016 (izq.).



Dos técnicas (la fotogrametría digital, con algoritmos de correlación automática de imágenes ópticas, y la interferometría, que procesa la información de fase en imágenes de radar) fueron inventadas hace mucho tiempo para la cartografía en 3D del relieve terrestre, a partir de imágenes tomadas con configuraciones estereoscópicas.

Justamente hace más o menos veinticinco años llegaron las imágenes ópticas del SPOT y las imágenes de radar del ERS-1, que tenían la configuración geométrica adecuada y se hizo la demostración de su capacidad para la cartografía del relieve. Pero en los dos casos, el satélite llevaba a bordo un sensor único, y para tomar un par estereoscópico de imágenes tenía que volver después de un tiempo que

podía ser de varias semanas o hasta varios meses. La consecuencia es que el paisaje observado podía cambiar bastante debido a la lluvia, a la nieve, a las cosechas... Así que estas dos técnicas, en muchos casos, no funcionaban.

Para resolver este problema, era preciso llevar dos sensores en la misma plataforma. Se logró en la década del 2000: el transbordador espacial fue preparado para una misión con dos antenas de radar (la misión Shuttle Radar Topography Mission [SRTM]), que produjo el primer modelo digital de terreno casi mundial, y en el 2002, al satélite SPOT-5 le fue añadido el sensor High Resolution Stereoscopic (HRS) de dos cámaras, que aumentó mucho la capacidad del sistema para la cartografía del relieve.

3. Otra evolución en los últimos veinticinco años fue el desarrollo de los sistemas de información geográfica (SIG). Yo no voy a definir lo que es un SIG en este congreso de especialistas, pero quisiera hacer algunos comentarios sobre el papel particular de las imágenes de percepción remota dentro del conjunto más ancho de la información geográfica. El SIG es el marco en el cual la percepción remota proporciona sus productos, y ayuda para combinar diferentes imágenes y administrar su geometría.

Hace más o menos veinticinco años (de nuevo), se desarrolló el mercado de la ortofoto u ortoimagen digital, que es exactamente la forma que la imagen de percepción remota debe tener para desempeñar su papel en un SIG y se volvió un producto estándar en muchos proyectos de desarrollo.

¿Cuáles son las características de la imagen de percepción remota con respecto a

las otras capas de información contenidas en un SIG?

Es una información espacialmente densa: una consecuencia práctica es el volumen de datos, mucho más importante que para cualquier otra capa.

- Es una información de múltiples usos: no es una información temática, no es filtrada de acuerdo con una aplicación temática (ya que tengo que hablar del desarrollo y de la paz, creo que el hecho de reunir a todos los usuarios alrededor de la misma información es un detalle interesante).
- La imagen de percepción remota no depende de la estructura del paisaje, y eso le permite superar una limitación grave del SIG. Al SIG, en su concepción clásica, le gustan los paisajes estructurados, donde las parcelas tienen límites discontinuos y un contenido homogéneo, así que pueden ser



**Figura 5.** Imágenes de percepción remota: a la izquierda, una imagen con contenido homogéneo; a la derecha, una imagen de un paisaje natural.

*Fuente: ArcMap, 2017.*



consideradas como objetos con sus atributos. Eso es ideal para paisajes de agricultura extensiva y mecanizada (por ejemplo en la imagen izquierda de la figura 5), pero no funciona para paisajes naturales donde uno pasa, sin percibirlo, de un ecosistema al otro (a la derecha en la figura 5).

- Y finalmente, es accesible para todos, o sea que al contrario del mapa tradicional, que está lleno de símbolos y necesita una cultura técnica sólida, la imagen puede ser leída por cualquier persona, hasta por un niño o por alguien que no habla el idioma oficial del país. Y frente a la necesidad de concientizar a la población sobre los asuntos ambientales, esa es una ventaja muy grande.

4. Otra evolución importante de las técnicas de percepción remota es lo que podemos llamar un cambio de escala, debido a un mejoramiento espectacular de la resolución.

Mirando la evolución de la resolución de los sensores remotos a lo largo del tiempo, hubo un mejoramiento continuo, sin ruptura, o sea que no ocurrió ninguna revolución tecnológica. En realidad, aparecen dos tendencias que podemos llamar *innovación* y *tradición*. Vamos a hablar de innovación cuando una agencia se aprovecha de cualquier novedad tecnológica para mejorar siempre la resolución de cada nuevo satélite. Vamos a hablar de tradición cuando se mantiene la misma resolución, porque es más seguro, porque los usuarios ya están acostumbrados y porque eso permite alimentar observatorios del medio ambiente con series temporales homogéneas.

Cuando se habla de desarrollo sostenible, puede ser interesante preferir la continuidad en vez de estar jugando siempre con las técnicas nuevas. Parece que en los últimos años los sistemas de resolución métrica han reunido la innovación y la tradición porque las imágenes que están disponibles ahora por satélite, por primera vez, son parecidas a las imágenes que desde siempre eran proporcionadas por sensores aéreos. Tienen las mismas características técnicas, y la única diferencia que existe ahora entre imágenes aéreas y satelitales es el tiempo que el usuario tiene que esperar para recibirlas, sobre todo si precisa de muchas imágenes para hacer un mosaico.

Es muy interesante poder mejorar la resolución, y el hecho de ver más cerca realmente ofrece nuevas posibilidades. Pero hay peligros o efectos secundarios, como se dice, para los remedios.

- Se volvió más y más difícil mejorar la resolución de los sensores debido a limitaciones físicas, y en esta situación es muy importante que el usuario sepa de qué se está hablando, y que no se confunda entre la resolución, que es el verdadero desafío tecnológico, y el tamaño del pixel que puede ser reducido sin ninguna dificultad. Es común comprar una imagen con un pixel de 80 cm y una resolución de 1,50 m, y creer que estamos con una resolución de 80 cm.
- Otro problema es la vigilancia ambiental sobre períodos de 30 a 40 años porque se hace con resoluciones que han cambiado mucho. Entonces, ¿cómo puedo concluir que el medioambiente se transforma si el ojo que está mirando también está cambiando?



Finalmente quería llamar su atención sobre lo siguiente: es que con el cambio de escala los objetos geográficos cambian de nombre. En la figura 6, a la izquierda, mirando de cerca, yo veo casas, y mirando de lejos yo veo un barrio residencial: tengo que usar otro nombre para hablar de la misma cosa. En este cuadro de Archimboldo (figura 6, derecha), mirando de cerca yo veo legumbres, y mirando de lejos yo veo el retrato de un hombre.



**Figura 6.** La percepción cambia con la escala: a la izquierda, una imagen Pléiades de una zona céntrica de Madrid, España; a la derecha, una pintura de Archimboldo (1591).

Fuente: CNES, Distribution ASV / Spot Image S. A., 2012 (izq.); Wikimedia Commons (der.).

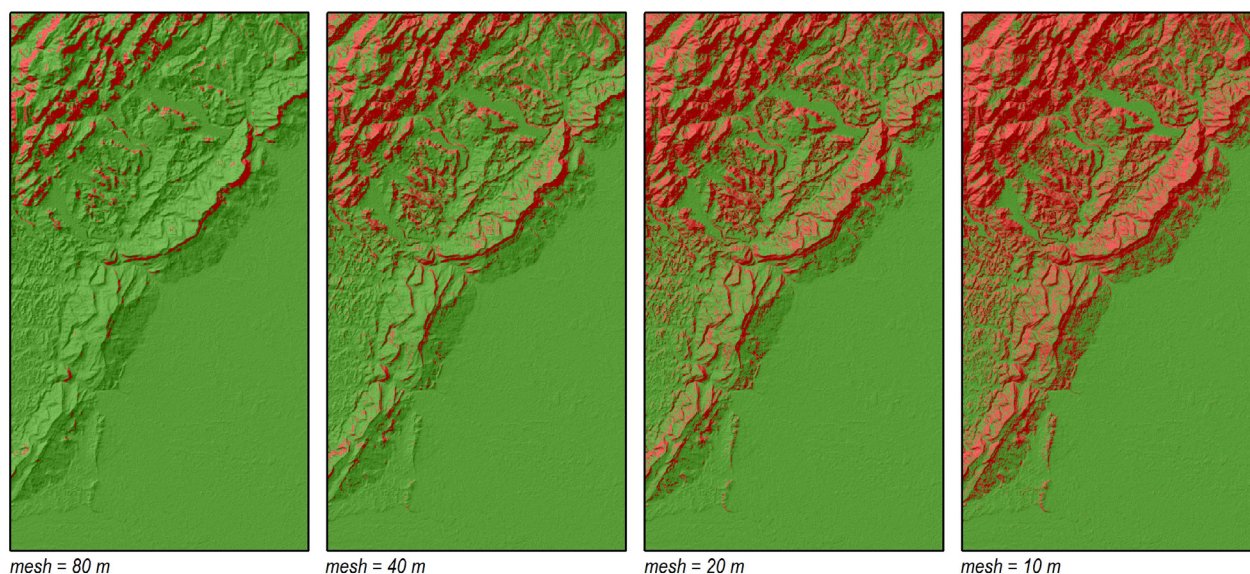
Hace tiempo que hacemos mapas temáticos con imágenes de satélite usando algoritmos de clasificación, y el hecho de hacerlo ahora con imágenes de alta resolución exige teóricamente una redefinición del nombre de las clases. Pero muchas veces no lo hacemos.

Hasta las conclusiones de los análisis cambian cuando se mejora la resolución,

y lo muestro con este ejemplo donde un modelo digital de terreno es usado para mapear el riesgo de erosión (figura 7).

En rojo están representadas las áreas donde la pendiente es mayor que 20°. Aparece claramente que la mejor resolución nos lleva a concluir que el riesgo es mayor. Muchas veces hemos cambiado de escala sin tener cuidado.





**Figura 7.** Modelo digital de terreno usado para mapear el riesgo de erosión

*Fuente: IGAC, 2017.*

5. Evolución de los métodos de interpretación. Recuerdo que cuando empecé ya existían muchos métodos de procesamiento para la interpretación de las imágenes, con algoritmos de filtraje, de clasificación, de análisis de textura, de reconocimiento de formas y muchos otros. Hubo muchos trabajos de investigación para mejorarlos, pero también aparecieron sus limitaciones, y creo que fueron superadas introduciendo enfoques nuevos. Por ejemplo, se hizo un uso mayor de las herramientas matemáticas de modelización de los objetos que habían nacido anteriormente, como la lógica borrosa o difusa (Zadeh, 1965), la geoestadística (Matheron, 1970) o la geometría fractal (Mandelbrot, 1975), que poco a poco se integraron en la geomática.

También acabó la ilusión de que el valor radiométrico del pixel permite definir una firma capaz de identificar cualquier objeto.

Es una creencia muy fuerte, y muchos esfuerzos fueron hechos para mejorar la calibración de las mediciones o desarrollar sensores de alta resolución espectral, pero este enfoque se queda muy limitado porque el valor del pixel es un flujo de energía; ¿y cómo hago, a partir de un flujo de energía, para identificar un valle, una ciudad, un barrio rico o un barrio pobre? Esta limitación fue superada, en algunos casos, introduciendo la noción de firma indirecta, que usa la correlación entre una variable no observable (como la densidad de población) y una variable observable (en la figura 8 se muestra un índice de textura calculado a partir de una imagen de Landsat clasificada donde aparecen los edificios en la ciudad de Belém, Brasil).

Las firmas indirectas han permitido la cartografía de variables geográficas que no son definidas directamente por el color o la geometría.



Entonces, los cinco ejes de evolución que acabo de describir muestran que durante los últimos veinticinco años no hubo ruptura tecnológica, pero las técnicas de percepción remota se volvieron más maduras, sus limitaciones fueron parcialmente superadas a medida que empezaban a acompañar la concientización de todos los problemas ambientales, y esta concientización es una de las grandes novedades de los últimos veinticinco años.



**Figura 8.** Índice de textura calculado a partir de una imagen de Landsat clasificada en Belém, Brasil

*Fuente: U. S. Geological Survey & Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2017.*

Ahora quisiera volver al título de la conferencia y a esta pregunta inicial: ¿cuáles son los aportes de la percepción remota para construir la paz? Podemos definir la paz como la seguridad de la humanidad, o sea la ausencia de agresión. Pero hoy en día sabemos que no es posible definir la paz o buscarla sin incluir el medio ambiente. Me gusta mucho un cuadro del pintor español Goya, donde dos hombres están peleando (figura 9).

Esta pintura simboliza el conflicto entre dos partidos en la época del pintor (los liberales y los absolutistas), pero en realidad hay tres actores en esta escena, ya que los dos hombres están hundiéndose en el barro, o sea que la naturaleza, aunque no haya firmado ninguna declaración de guerra, está disponible para entrar en el conflicto.







**Figura 9.** *Duelo a garrotazos*, de Francisco de Goya (1822)  
Fuente: Museo del Prado, 2017.

Finalmente, podemos considerar tres tipos de agresión, y en los tres casos la percepción remota permite observar, localizar y analizar.

#### *1. Agresión de la naturaleza sobre la sociedad*

Son los desastres naturales, y la percepción remota siempre ha ayudado bastante para entender los fenómenos y administrar sus consecuencias, como en el caso

de las erupciones volcánicas, los deslizamientos, los huracanes, los terremotos, los incendios y las inundaciones.

#### *2. Agresión de la sociedad sobre la naturaleza*

Estas agresiones son, generalmente, más escondidas, y en los dos ejemplos se trata de acciones contaminadoras ilegales: un sitio clandestino de lavado de oro en Surinam (figura 11, izquierda) y un barco que está lavando sus tanques y dejando



**Figura 10.** Imágenes ópticas de desastres naturales: a la izquierda, una imagen captada por el satélite Pléiades el 24 de julio de 2012, donde se aprecia la zona quemada por el incendio, que rodea completamente del pueblo de La Jonquera, en España; a la derecha, imagen infrarroja de la misma zona, donde también se aprecian los efectos del incendio.

Fuente: CNES, Distribution ASV / Spot Image S. A., 2012.

petróleo en la superficie del mar, en forma de una línea negra, en el estrecho de Gibraltar (figura 11, derecha). Ya que son actividades escondidas, la percepción remota, en muchos casos, es la única manera de verlas; solo falta darle a las imágenes un valor jurídico más claro.

### 3. Agresión de la sociedad sobre la sociedad

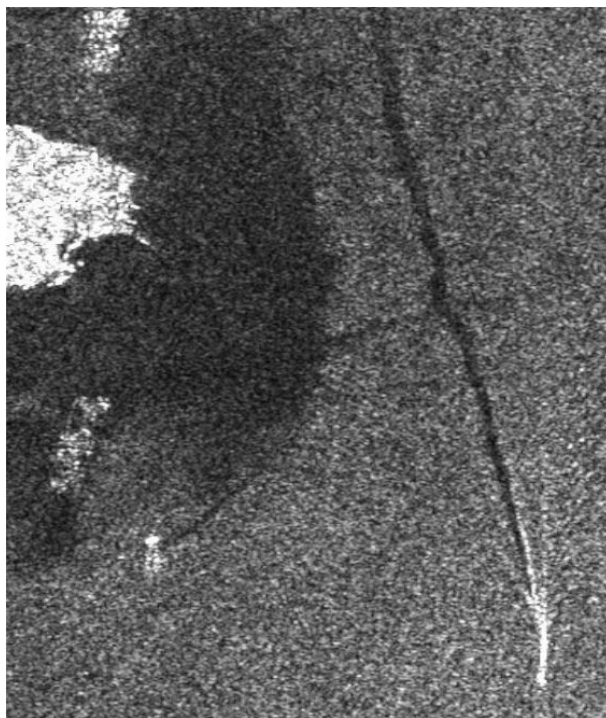
Aquí estamos en un contexto militar típico y sabemos que la percepción remota siempre fue una herramienta importante tanto para preparar agresiones como para

organizar la defensa. Pero fuera de las aplicaciones específicamente militares, las agresiones de la sociedad sobre la sociedad pueden tomar otra forma.

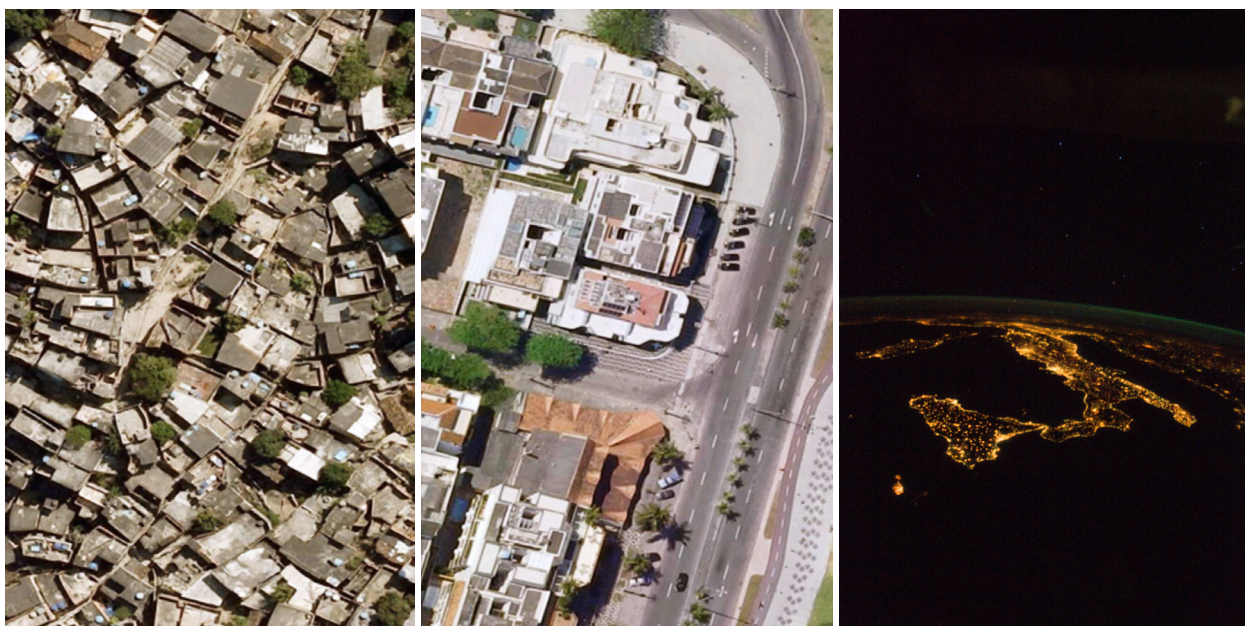
La pobreza es una, y las injusticias sociales no pueden ser escondidas a los detectores de un satélite, como lo nuestro aquí, comparando dos barrios de un mismo municipio en una ciudad suramericana, aunque las imágenes no sean suficientes para cuantificar el nivel de riqueza, de salud o de educación de la gente (figura 12, izquierda y centro).

**Figura 11.** Mina de oro en Surinam (izq.); estrecho de Gibraltar. Imagen SAR de Radarsat, del 21 de enero de 1998 a las 18:19 UTC (der.)

Fuente: Google DigitalGlobe, 2015 (izq.); Universidad Politécnica de Cataluña (s. f.).







**Figura 12.** La desigualdad social no puede esconderse de los detectores de un satélite  
 Fuente: ArcMap, 2017 (izq. y centro); NASA, 2014 (der.).

A una escala más global también podemos observar las injusticias sociales, como en esta imagen óptica nocturna que muestra grandes diferencias espaciales entre Europa y otros países en términos de consumo de energía (figura 12, derecha).

La observación con la percepción remota de la distribución espacial de la sociedad sobre la superficie de la Tierra es un apoyo muy grande como base de información, pero también, como lo dije anteriormente, como herramienta de comunicación y de negociación, ya que todos lo pueden ver, incluso sin ninguna capacitación técnica. Y eso es muy interesante para la elaboración de catastros y la administración de tierras, que siempre han sido asuntos que generan conflictos.

Si consideramos la superficie total de tierras emergidas en el mundo y la población mundial total, ¿cuál es la superficie

media disponible para cada uno? Tres hectáreas por persona. Es mucho. El problema es que hay muchas áreas donde no es fácil vivir, la naturaleza colocó obstáculos, la historia humana colocó obstáculos. Frente a esta realidad, y aunque la solución del problema tiene que ser política, la percepción remota ofrece una posibilidad única para identificar y entender estos obstáculos.

Así, cuando una ciudad está creciendo, la geometría del tejido urbano nos muestra las áreas donde aparece la expresión de una política de propiedad de la tierra y las áreas donde los obstáculos naturales interrumpen la propagación del fenómeno de urbanización, como se ve en la imagen Landsat de la ciudad de Macapá, en Brasil (figura 13).

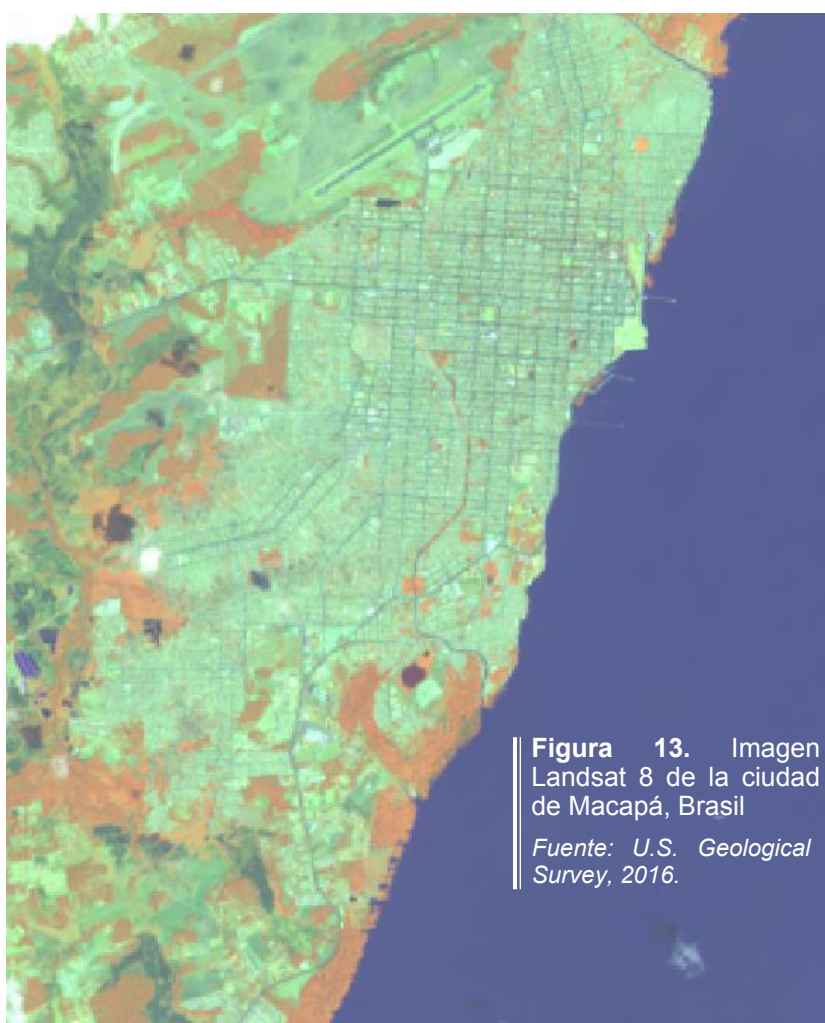
Y, por fin, las imágenes pueden ayudar también para asegurar la delimitación de la propiedad privada, ya que los límites



de parcelas pueden ser materializados en el campo, pero también en las imágenes; esta solución es técnicamente madura, solo falta, en cada país, darle un valor jurídico.

El último comentario que quisiera hacer sobre este asunto de la percepción remota como ayuda para construir la paz, es sobre la importancia de la cooperación internacional. En su famosa obra *Hacia la paz perpetua*, el filósofo alemán Emmanuel Kant (1724-1804) coloca las bases teóricas de una paz global que no define como la ausencia de conflictos, sino como una situación donde los conflictos son imposibles, y muestra que la paz

solo puede ser asegurada por el derecho y que este derecho tiene que ser construido dentro de una organización de todas las naciones del mundo. Y, justamente, es en el marco de las organizaciones internacionales que se definen la mayoría de los programas de percepción remota y los sistemas geodésicos, o sea que esta pregunta sobre los aportes de la percepción remota para construir la paz tiene dos razones para ser estudiada en un contexto de cooperación internacional. Además, la investigación científica es un fenómeno que se construye cada día a través de la cooperación internacional y el objetivo de la investigación es la elevación del nivel intelectual de la humanidad.



**Figura 13.** Imagen Landsat 8 de la ciudad de Macapá, Brasil  
Fuente: U.S. Geological Survey, 2016.



¿Será que eso no es una contribución a la paz?

Para concluir, no percibí ninguna revolución tecnológica en los últimos veinticinco años, pero los métodos de percepción remota se han vuelto más maduros y estamos más lúcidos sobre sus limitaciones. No debemos ser ingenuos y creer que la tecnología puede resolver todo, pero tenemos que reconocer el poder de la percepción remota para aplicaciones como la gestión de los riesgos naturales y la administración de la propiedad de la tierra, que realmente contribuyen a la seguridad de la humanidad, así como la posibilidad de mostrar a cualquier ciudadano una imagen del mundo donde vive a través de una lectura intuitiva, que es una manera de asociar a todos a las preocupaciones ambientales. Sabemos que esa es una condición del éxito del desarrollo sostenible.

Sin embargo, esta situación nueva, que no existía veinticinco años atrás, nos da una responsabilidad grande. Para nosotros, para nuestra comunidad industrial y científica, frente a los desastres ecológicos y humanos que ocurren, ya no es posible pretender que no sabíamos.

Y si me autorizan una última frase de conclusión, quisiera decir que esta historia que les presenté en diferentes escalas de tiempo (400 años, 50 años y finalmente 25 años, que es el período que tuve la oportunidad de acompañar) es una visión personal y parcial, pero me parece importante que cada uno, y principalmente los más jóvenes, se interesen en el asunto para construir su propio entendimiento del pasado y poder inventar el futuro, ya que, como decía el filósofo Henri Bergson, el futuro no es lo que va a ocurrir, sino lo que nosotros vamos a hacer.



## Bibliografía

- ArcMap (2017). *World Imagery*. Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AeroGRID, IGN, and the GIS User Community.
- Astrium GEO-Information Services (2012). *Pléiades Imagery User Guide*, V. 2.0. Recuperado de: <http://www.cscrs.itu.edu.tr/assets/downloads/PléiadesUserGuide.pdf>.
- CNES, Distribution ASV / Spot Image S. A. (julio 24, 2012). *Incendio en el pueblo de La Jonquera, España*. Imágenes recuperadas de <http://www.infoterra.es/image-gallery>.
- David Rumsey Historical Map Collection (S. f.). *Facsimile: Guiana by de Bry*. Recuperado de: <http://www.davidrumsey.com/luna/servlet/detail/RUMSEY~8~1~203959~3001742:Facsimile--Guiana-by-de-Bry->.
- Infoterra SGSA (2016). *Satélite SPOT 4 y 5*. Recuperado de <http://www.infoterra.es/datos-satelite-spot>.
- Francisco de Goya (2016). *Duelo a garrotazos*. Recuperado de <https://www.museodelprado.es/coleccion/obra-de-arte/duelo-a-garrotazos/2f2f2e12-ed09-45dd-805d-f38162c5beaf>.
- Giuseppe Arcimboldo (2016). *Rudolf II as Vertumnus*. Recuperado de <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Arcimboldovertemnus.jpeg>.
- Google DigitalGlobe (2015). *Gold mining in Suriname*. Recuperado de <http://amazonteam.org/maps/suriname-gold/>.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2017). *Modelo digital de terreno usado para mapear el riesgo de erosión*. Bogotá: IGAC, Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), Grupo de Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas.
- Luque, B. (11 de mayo, 2010). *Atmósfera: cuando vimos lo que durante tanto tiempo habíamos imaginado*. *Heraldo de Aragón, Suplemento de ciencia Tercer Milenio*, 542. Recuperado de <http://www.dmae.upm.es/WebpersonalBartolo/divulgacion.html>.







National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2016). *Shuttle Radar Topography Mission*. Recuperado de <https://www.jpl.nasa.gov/missions/shuttle-radar-topography-mission-srtm/>.

National Aeronautics and Space Administration (NASA) (Dec. 15, 2014). *Italy at Night*. Recuperado de [https://www.nasa.gov/images/content/684493main\\_italy\\_boot\\_full\\_full.jpg](https://www.nasa.gov/images/content/684493main_italy_boot_full_full.jpg).

Universidad Politécnica de Cataluña (S. f.). Principios de adquisición de imágenes del SAR. *UPCommons. Portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC*. Recuperado de [http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93692/2\\_3\\_Satelites\\_con\\_SAR.pdf?sequence=10&isAllowed=y](http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/93692/2_3_Satelites_con_SAR.pdf?sequence=10&isAllowed=y).

U. S. Geological Survey (2004). *Image SPOT 5*. Courtesy of the U.S. Geological Survey. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

U. S. Geological Survey (2016). *Imagen Landsat 8 de la ciudad de Macapá, Brasil*. Landsat 8 - 2016-12-20T09:20 - Combinación 5, 6, 4. Courtesy of the U. S. Geological Survey. Recueprado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

U. S. Geological Survey & Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) (2017). *Índice de textura calculado a partir de una imagen Landsat 8*. Image courtesy of the U.S. Geological Survey (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), processed at the IGAC, Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF), Grupo de Percepción Remota y Aplicaciones Geográficas.



# Ingeniería para el diseño de territorios

## *Territory design engineering*

Edwin Robert Pérez Carvajal<sup>1</sup>

“Cómo citar este artículo: Pérez Carvajal, E. R. (2017). Ingeniería para el diseño de territorios. *Análisis Geográficos*, 52, 35-52.

### Resumen

Las preocupaciones sobre la planificación del territorio convocan a la ingeniería a desempeñar un rol más social y más humano, orientando el ejercicio de esta disciplina hacia la intervención, la imaginación, el diseño y la construcción de escenarios posibles para la realización de territorios éticos, que propicien desarrollos humanos sostenibles, para los cuales la inteligencia artificial, el modelado computacional, los sistemas de información geográfica y otros aparatos matemáticos deberían concurrir en apoyo de enfoques emergentes basados en la complejidad, en teorías evolutivas o en la ingeniería de sistemas sociales. Es por esto que la propuesta de este artículo se orienta a considerar los sistemas sociales, formados por agentes libres que toman sus propias decisiones, como sistemas sociotécnicos y artefactos sociales constituyentes y constituidos por conceptos como el bienestar general, el desarrollo sostenible, la protección al medioambiente, la democracia y la disminución de los riesgos. Sobre estos problemas es viable aplicar el método de ingeniería definido por Billy Vaughn Koen como el uso de heurísticas para generar los mejores cambios en situaciones con escasos recursos y pobremente entendidas, con cambios direccionados hacia el diseño de imaginarios de los sistemas y la intención de estudiar sus estructuras, relaciones y emergencias al servicio de la transformación de escenarios posibles en escenarios alcanzables. El presente documento comprende dos partes: la primera consiste en una rápida mirada de los enfoques teóricos que permiten la conceptualización sobre la ingeniería y el modelado de sistemas sociotécnicos, así como de algunas herramientas de ingeniería disponibles para el diseño y operación de los modelos para el diseño de territorios; la segunda parte es un resumen de un estudio de caso en ejecución que puede servir como ejemplo para estudios futuros.

**Palabras clave:** planificación territorial, teorías evolutivas, sistemas basados en agentes, diseño en ingeniería, desarrollo a escala humana.

<sup>1</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo: [erperezc@udistrital.edu.co](mailto:erperezc@udistrital.edu.co), [edwinperezc@gmail.com](mailto:edwinperezc@gmail.com).



## **Abstract**

*Concerns about regional planning summon to engineering to play a more social and human role, guiding the practice of engineering towards intervention, imagination, design and construction of possible scenarios for the realization of ethical territories which promote sustainable, for which artificial intelligence, human development, computational modeling, geographic Information systems and other mathematical apparatus should attend in support of emerging approaches based on complexity, evolutionary theories or social systems engineering. It is proposed here consider social systems consist of free agents who make their own decisions as socio-technical systems, such as social artifacts, constituent and constituted by concepts like the general welfare, sustainable development, environmental protection, democracy and declining risks, problems on which it is feasible engineering method defined by Billy Vaughn Koen and the use of heuristics to generate the best changes in situations with few resources and poorly understood, addressed to the imaginary design of such systems, encouragement to study their structures, relationships and emergency service of the transformation of possible scenarios achievable scenarios. This document includes two parts: First, a quick look of the theoretical approaches that allow the conceptualization of engineering and modeling socio-technical systems as well as some engineering tools available for the design and operation of the models for the design of territories and the second part is a summary of a case study on implementation as an example for possible cases of empirical study.*

**Keywords:** Territorial planning, Evolutionary theories, Agent-based systems, Engineering design, Human scale development.



*El ordenamiento del territorio planifica el espacio, preparándolo en el horizonte de la utilidad, para la cual la naturaleza ya no es un mero objeto de estudio, se ha convertido en un almacén de existencias de energías, donde los entes ahora gobiernan en forma de recursos potenciales, la belleza en forma de arte y los sentimientos en forma de publicidad.*

**Martin Heidegger**

## Introducción

La ingeniería de sistemas sociales es un enfoque de este campo de conocimiento que se ocupa del diseño de sistemas que son formados y recreados por agentes libres que toman sus propias decisiones (es decir, que no se pueden describir con leyes científicas), y considera que las instituciones, las empresas, las organizaciones sociales y, por supuesto, el territorio, pueden ser tratados como un sistema sociotécnico. No obstante, dada la magnitud y el impacto de tal “laboratorio social” en el cual se termina por “moldear” el mundo según la imaginación y voluntad de sus diseñadores, es inevitable enfrentarse a inquietudes como: ¿de qué manera y quién define los problemas y los objetivos de una comunidad? ¿Quién y cómo debe asumir los diferentes roles y responsabilidades en el diseño del sistema social? ¿Qué responsabilidades tienen los ingenieros de hoy con el futuro de las generaciones actuales y con los presentes de las generaciones futuras?

La ingeniería moderna utiliza la ciencia, que comúnmente es vista como ciencia aplicada, pero en realidad es algo diferente a la solución de problemas científicos: un buen ingeniero no es automáticamente un buen científico o viceversa (Kroes, 2012). Por el contrario, no es la *ciencia*

la regla de la ingeniería, sino el *diseño*, como manifiesta Koen (2003): “El diseño en ingeniería o el método de ingeniería consiste en el uso de heurísticas para generar el mejor cambio posible en una situación pobremente entendida, con los recursos disponibles”. El presente artículo tiene como objetivo dar a conocer alternativas de planificación basadas en enfoques alternativos que se apartan de los conceptos económicos, ingenieriles y de administración tradicionales, para lo cual se hace referencia al modelo organizacional jerárquico de agentes naturales del agua (Mojana), que está en construcción, para ilustrar la viabilidad y bondades del enfoque.

## Materiales y métodos

### ***Sobre el modelado de ingeniería***

“La ciencia busca entender el mundo tal y como este es, solo la ingeniería puede cambiarlo” (Petroski, 2009). Así, Petroski invita a la ingeniería y a los ingenieros a abandonar la denominación de *ciencia aplicada* en la que histórica, pero erróneamente, ha sido catalogada y a reclamar y asumir el rol fáctico y de transformación que la ingeniería ha ejercido históricamente: “es la ingeniería, no la ciencia, la que aporta los mayores beneficios para la humanidad.



La ciencia como investigación pura es un lujo” (Petroski, 1999). En la misma dirección de lo expresado por Petroski, cuando afirma que los sistemas legales son la ingeniería de la razón y la ciencia misma puede ser descrita como la ingeniería de las teorías, la planificación del territorio podría presentarse como la ingeniería del habitar. En consecuencia, al imaginar escenarios de desarrollo y ordenamiento territorial se deben abandonar las metas exclusivas de la optimización y el crecimiento económico tradicionalmente establecidos, para apuntar hacia problemas (no económicos) de las comunidades, donde el diseño de ingeniería, como un proceso de toma de decisiones<sup>2</sup>, tiene el reto de diseñar desarrollos de territorios que posibiliten bienestar humano, emplazando a la ingeniería a comparar eventos y espacios pasados con acontecimientos y logros presentes para pensar e idealizar potenciales futuros; esto según Epstein (2008) es la base del diseño en ingeniería.

En consecuencia, desde un enfoque posmoderno se podría reevaluar la idea de modelos exclusivamente predictivos (como los explícitos) para incorporar una pregunta más general y, si se quiere, más teleológica y ética, más filosófica: ¿por qué modelar?, a la que Epstein (2008) responde presentando alternativas del modelado para distintos propósitos, tales como:

- Explicar
- Recolectar datos guía
- Iluminar dinámicas fundamentales
- Sugerir analogías dinámicas

- Descubrir nuevas preguntas
- Promover un hábito científico de la mente
- Limitar (precisar) los resultados en rangos creíbles
- Iluminar las incertidumbres (desconocimientos) básicas
- Ofrecer alternativas de crisis casi en tiempo real
- Mostrar alternativas o sugerir eficiencias
- Desafiar la robustez de las teorías predominantes a lo largo de perturbaciones
- Exponer la incompatibilidad de los juicios predominantes con los datos disponibles
- Entrenar practicantes
- Disciplinar el diálogo político
- Educar al público en general
- Descubrir la complejidad (sencillez) de lo aparentemente simple (complejo)

Desde esta mirada, el significado del modelado de sistemas sociales planteados desde la perspectiva *bottom up*, que integre actores, usuarios y diseñadores, rompe con la tradicional estructura rígida *sujeto-objeto* en la investigación. El *modelado participativo*, apoyado en un enfoque de *modelado integrado*, surge como aproximación a ser tomada en cuenta en el estudio de sistemas socioecológicos<sup>3</sup> que iluminen el qué, el cómo, el cuándo, el dónde, el para qué, el porqué y con quiénes modelar y diseñar territorios.

---

<sup>2</sup> Esto según la definición del Accreditation Board for Engineering and Technology (ABET).

<sup>3</sup> Término utilizado por Berkes y Folke (1998) para enfatizar el concepto integrado de “ser humano en la naturaleza”, caracterizado por la no linealidad, la complejidad, la incertidumbre, la emergencia, la escala, la autoorganización, la vulnerabilidad, la capacidad adaptativa, la transformación, la heterogeneidad y la resiliencia.

## **Modelado participativo**

Para Lapointe (1998), una comunidad humana puede ser vista como una entidad holística con fines propios, compuesta por múltiples agentes actuando con intereses individuales, o como manifestaciones externas de la naturaleza humana para crear y poner en práctica sus intenciones y valores, por lo que es posible visualizar una comunidad territorial como el resultado de fuerzas fundamentales responsables de provocar un desarrollo saludable, de prosperidad y de bienestar, a manera de facilitadores que catalizan la satisfacción de las necesidades en las comunidades.

De esta manera, el autor señala que las capacidades humanas sanas surgen cuando los sistemas sociales están diseñados para promover:

- Los valores humanistas y de bienestar;
- dinámicas bidireccionales de intercambios entre las personas;
- sistemas de comunicación abiertos que toleran perspectivas pluralistas;
- personas en sus esfuerzos por establecer y perseguir sus objetivos;
- personas en su búsqueda de nuevos propósitos;
- los beneficios que las personas pueden obtener de sus esfuerzos;
- la libertad individual a través de controles y equilibrios democráticos que pesan los deseos o necesidades de la mayoría.

Tales procesos de modelado de sistemas sociales, y específicamente un modelo socioecológico, tendrán que convivir con los riesgos y potencialidades propios de los fenómenos de la dimensión humana.

Dichos procesos deberán ser contruidos desde los diferentes actores interesados (Voinov & Bousquet, 2010): comunidades, instituciones públicas y privadas, sector productivo y la academia, que definen las especificaciones en los siguientes aspectos:

- Definición de propósitos del modelo
- Definición de usuarios
- Resolución y escala espacial
- Resolución y escala temporal
- Definición de actores
- Definición de problemas
- Ajuste y selección de los modelos

El modelado participativo deberá soportarse necesariamente en modelos de sistemas socioecológicos que integren aspectos naturales y humanos en contextos espaciotemporales. Si pensamos en tres dimensiones críticas: espacio, tiempo y toma de decisiones humanas, las dos primeras proporcionan un entorno común en el que todos los procesos biofísicos y humanos operan, y la tercera cobra tanta importancia como las otras dos al incorporar procesos humanos. En la figura 1, que representa la articulación de las tres dimensiones, vemos que en el plano sombreado (dimensión espaciotemporal x-y) habitan los modelos biofísicos, mientras en el eje z (dimensión humanística) habitan los modelos relacionados con la toma de decisiones humanas. Si la complejidad disminuye en dirección al origen del gráfico y aumenta en dirección contraria, es posible ver cómo los modelos representados por la letra A (modelos estadísticos y series de tiempo sin componentes de

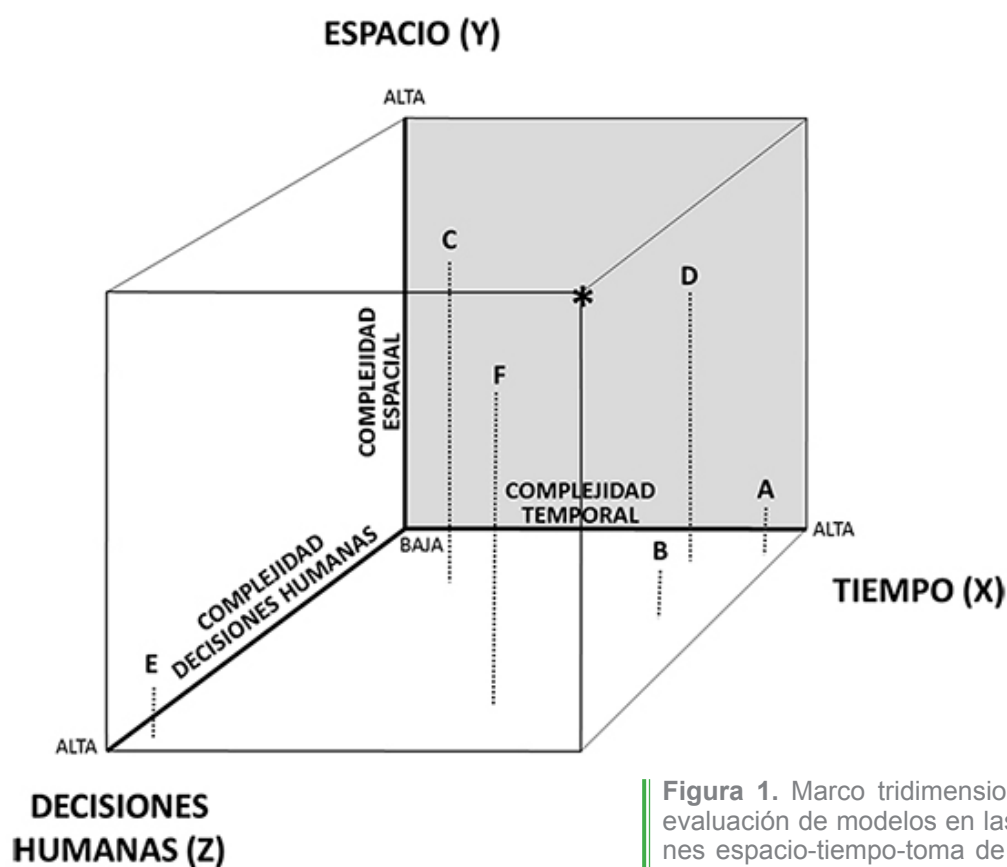




decisiones humanas) tendrán un alto nivel de complejidad temporal, pero muy bajo nivel de complejidad espacial y de decisiones humanas, mientras a un modelo representado por la letra C (sistemas de información geográfica [SIG] convencionales, sin series de tiempo) le corresponderá un alto nivel de complejidad espacial, pero unos niveles de complejidad temporal y de decisiones humanas muy bajos. Los modelos representados por la letra E (modelos econométricos y modelos basados en teorías de juegos) consecuentemente tendrán un bajo nivel de complejidad espacial y temporal, pero un alto nivel de complejidad de decisiones humanas. Los modelos D, como los SIG con componentes temporales, están

caracterizados por su alta complejidad espaciotemporal y su baja complejidad humanística. Los modelos B representan las series de tiempo con componentes de decisiones humanas, y los F son modelos espaciales ecológicos, tipo SWARM o SME. La meta de un modelado de sistemas socioecológicos es ubicarse en la posición marcada con el asterisco (\*) para capturar la máxima complejidad en las tres dimensiones.

Ahora bien, la ciencia y las tecnologías modernas han dado buena cuenta de la descripción y el modelado de las dimensiones espaciotemporales y de gran parte de los fenómenos biofísicos. Entre tanto, y como parte de los retos ingenieriles, hace falta abordar el modelado de la



**Figura 1.** Marco tridimensional para la evaluación de modelos en las dimensiones espacio-tiempo-toma de decisiones humanas.

*Fuente:* Agarwal et al. (2002).

dimensión relacionada con las decisiones humanas, para lo cual se propone el apoyo del modelado participativo (que respondería a la pregunta sobre *quiénes*) y el modelado socioecológico (que responde al *cuándo y dónde*) en las teorías evolutivas aplicadas en los sistemas sociales (para responder el *cómo*) y el desarrollo a escala humana propuesto por Max-Neef (1994) (indagando sobre el *qué y para qué*).

### **Teorías evolutivas en los sistemas sociales**

#### **Epistemología de Campbell**

Una teoría del conocimiento amparado en un enfoque evolucionista Campbell (1974), como lo expresa Popper, “no reside en la justificación de una creencia verdadera, sino en la puesta a prueba de esa creencia”, soporta la epistemología de “variación ciega y retención selectiva” con la que Campbell propone explicar los mecanismos que propician el proceso del conocimiento, y que pueden ser sintetizados en tres procesos:

1. Variación
2. Procesos de selección
3. Mecanismos para preservar o propagar las variaciones seleccionadas

En términos de Campbell, existe no solo un flujo de información en el desarrollo del conocimiento, sino toda una estructura jerárquica que se fundamenta en los procesos de variación, selección y retención, a partir de los cuales se produce una causalidad que, al basarse en aleatoriedad, implica también unidireccionalidad. Esta compleja categorización evolutiva que, según

Campbell, abarca el dominio cognitivo, abraza también la ciencia, donde el experimento es el mecanismo de variación, el aprendizaje es el de selección y el lenguaje es el mecanismo de retención en el contexto social, lo cual indica la necesidad de un *locus* social donde las reglas puedan ser desarrolladas, por lo cual es posible establecer una relación con un modelado de sistemas socioecológicos donde habitan reglas y una epistemología evolutiva de la información y de las organizaciones sociales, como la propuesta por Campbell.

#### **Ontología de Dopfer**

La idea principal del enfoque de Dopfer, desde la óptica de la economía evolutiva, supone que un sistema económico es un proceso, compuesto por una población de reglas, que obedecen a una estructura (Dopfer, Foster & Potts, 2004).

Para que la dinámica del proceso se mantenga en marcha a partir de las poblaciones de reglas, la noción de *transportadores de conocimiento* cumple un rol fundamental dentro del engranaje de su sistema económico, al permitir el intercambio y la interconexión entre agentes y poblaciones que obedecen a unas estructuras pero que, a la vez, están sujetos a la coevolución (Dopfer, 2004).

Tal transferencia de conocimiento se da no solo en los clásicos niveles micro y macro, sino además en un nivel meso. Un esquema muy general del sistema puede apreciarse en la tabla 1, donde se evidencia que en las tres fases del conocimiento: origen (variación), adopción (selección) y retención, se producen efectos en los tres niveles de la estructura Dopfer (2005).

Para Dopfer, la transmisión e intercambio de conocimiento, además, sigue la misma



caracterización propuesta por Nelson y Winter (1982) para la innovación, en relación con su *irreversibilidad* (una vez iniciado no puede ser truncado), *contingencia* (se desconoce el desenlace del proceso de innovación) y *dependencia* (tiene causalidad y direccionalidad temporal).

De acuerdo con lo anterior, es posible considerar cómo las actuaciones políticas de la sociedad, en un ámbito socioecológico, pueden propiciar la generación de reglas (ideas) ya no exclusivamente desde el nivel micro, sino desde el nivel meso y macro, y aun así acoger la ontología de Dopfer, la epistemología de Campbell y los principios de la genética de poblaciones que pueden alimentar un enfoque basado en agentes utilizado para un modelado de la dimensión de las decisiones humanas.

### **Desarrollo a escala humana: necesidades, satisfactores y bienes económicos**

Para abordar los aspectos que fundamentan las decisiones humanas (como dimensión de los sistemas socioecológicos ilustrados en la figura 1), es necesario destacar las diferencias conceptuales entre necesidades, satisfactores y bienes económicos. En la tabla 2 se presenta la matriz de necesidades y satisfactores propuesta por Max-Neef (1994), según la cual propone que:

Esta combinación permite operar con una clasificación que incluye, por una parte, las necesidades de Ser, Tener, Hacer y Estar; y, por la otra, las necesidades de Subsistencia, Protección, Afecto, Entendimiento, Participación, Ocio, Creación, Identidad y

**Tabla 1.** Fases y niveles del conocimiento de Dopfer

<b>Fase 1: origen de la idea (regla)</b>	Variación-innovación Generación de la regla	Micro
	Selección y adopción en la población	Meso
	Coordinación de la estructura de reglas	Macro
<b>Fase 2: adopción de la idea (regla)</b>	Adopción, aprendizaje y adaptación de la regla a la base de conocimiento individual o socialmente organizada	Micro
	Adopción y selección a nivel poblacional Elección de rutas	Meso
	Re-coordinación de la estructura de reglas	Macro
<b>Fase 3: retención de la idea (regla)</b>	Generación de hábitos y rutinas	Micro
	Retención y estabilización en la población	Meso
	Coordinación de la estructura de reglas	Macro

Fuente: Dopfer, 2005.



Libertad. [...] De la clasificación propuesta se desprende que, por ejemplo, alimentación y abrigo no deben considerarse como necesidades, sino como satisfactores de la necesidad fundamental de subsistencia. Del mismo modo, la educación (ya sea formal o informal), el estudio, la investigación, la estimulación precoz y la meditación son satisfactores de la necesidad de entendimiento (p. 41).

En consecuencia, Max-Neef formula dos postulados:

Primero: *Las necesidades humanas fundamentales son finitas, pocas y clasificables.* Segundo: *Las necesidades humanas fundamentales (como las contenidas en el sistema propuesto) son las mismas en todas las culturas y en todos los períodos históricos. Lo que cambia, a través del tiempo y de las culturas, es la manera o los medios utilizados para la satisfacción de las necesidades* (p. 42). [Las cursivas son del original]

Tabla 2. Matriz de necesidades y satisfactores

Necesidades según categorías existenciales Necesidades según categorías axiológicas	Ser	Tener	Hacer	Estar
<b>SUBSISTENCIA</b>	1/ Salud física, salud mental, equilibrio, solidaridad, humor, adaptabilidad	2/ Alimentación, abrigo, trabajo	3/ Alimentar, procrear, descansar, trabajar	4/ Entorno vital, entorno social
<b>PROTECCION</b>	5/ Cuidado, adaptabilidad, autonomía, equilibrio, solidaridad	6/ Sistemas de seguros, ahorro, seguridad social, sistemas de salud, legislaciones, derechos, familia, trabajo	7/ Cooperar, prevenir, planificar, cuidar, curar, defender	8/ Contorno vital, contorno social, morada
<b>AFECTO</b>	9/ Autoestima, solidaridad, respeto, tolerancia, generosidad, receptividad, pasión, voluntad, sensualidad, humor	10/ Amistades, parejas, familia, animales domésticos, plantas, jardines	11/ Hacer el amor, acariciar, expresar emociones, compartir, cuidar, cultivar, apreciar	12/ Privacidad, intimidad, hogar, espacios de encuentro
<b>ENTENDIMIENTO</b>	13/ Conciencia crítica, receptividad, curiosidad, asombro, disciplina, intuición, racionalidad	14/ Literatura, maestros, método, políticas educativas, políticas comunicacionales	15/ Investigar, estudiar, experimentar, aduar, analizar, meditar, interpretar	16/ Ámbitos de interacción formativa: escuelas, universidades, academias, agrupaciones, comunidades, familia
<b>PARTICIPACION</b>	17/ Adaptabilidad, receptividad, solidaridad, disposición, convicción, entrega, respeto, pasión, humor	18/ Derechos, responsabilidades, obligaciones, atribuciones, trabajo	19/ Afiliarse, cooperar, proponer, compartir, discrepar, acatar, dialogar, acordar, opinar	20/ Ámbitos de interacción participativa: cooperativas, asociaciones, iglesias, comunidades, vecindarios, familia

Necesidades según categorías existenciales Necesidades según categorías axiológicas	Ser	Tener	Hacer	Estar
<b>OCIO</b>	21/ Curiosidad, receptividad, imaginación, despreocupación, humor, tranquilidad, sensualidad	22/ Juegos, espectáculos, fiestas, calma	23/ Divagar, abstraerse, soñar, añorar, fantasear, evocar, relajarse, divertirse, jugar	24/ Privacidad, intimidad, espacios de encuentro, tiempo libre, ambientes, paisajes
<b>CREACION</b>	25/ Pasión, voluntad, intuición, imaginación, audacia, racionalidad, autonomía, inventiva, curiosidad	26/ Habilidades, destrezas, método, trabajo	27/ Trabajar, inventar, construir, idear, componer, diseñar, interpretar	28/ Ámbitos de producción y retroalimentación, talleres, ateneos, agrupaciones, audiencia, espacios de expresión, libertad temporal
<b>IDENTIDAD</b>	29/ Pertenencia, coherencia, diferencia, autoestima, asertividad	30/ Símbolos, lenguaje, hábitos, costumbres, grupos de referencia, sexualidad, valores, normas, roles, memoria histórica, trabajo	31/ Comprometarse, integrarse, confundirse, definirse, conocerse, reconocerse, actualizarse, crecer	32/ Socio-ritmos, entornos de la cotidianeidad, ámbitos de pertenencia, etapas madurativas
<b>LIBERTAD</b>	33/ Autonomía, autoestima, voluntad, pasión, asertividad, apertura, determinación, audacia, ebeldia, tolerancia	34/ Igualdad de derechos	35/ Discrepar, optar, diferenciarse, arriesgar, conocerse, asumirse, obedecer, meditar	36/ Plasticidad espacio-temporal

Fuente: Max-Neef (1994, pp. 58-59).



De esta manera, aunque las necesidades humanas básicas permanecen constantes independientemente del modo económico y político reinante en cada sociedad, cada cultura define y selecciona la calidad y la cantidad de sus satisfactores. Así, al existir diferentes satisfactores, Max-Neef no se refiere a la pobreza, sino a las carencias en virtud de la carencia de uno o más satisfactores, y a la existencia de más de una necesidad. Bajo estos criterios, el autor advierte la escasez de políticas de desarrollo orientadas hacia la satisfacción de las necesidades humanas fundamentales que trasciendan la racionalidad económica convencional e implican al ser humano en su totalidad:

Las necesidades revelan de la manera más apremiante el ser de las personas, ya que aquél se hace palpable a través de éstas en su doble condición existencial: como carencia y como potencialidad. Comprendidas en un amplio sentido, y no limitadas a la mera subsistencia, las necesidades patentizan la tensión constante entre carencia y potencia tan propia de los seres humanos (Max-Neef, 1994, p. 49).

En resumen, las necesidades no solo son carencias, sino también, y simultáneamente, potencialidades humanas individuales y colectivas. Los satisfactores son formas de ser, tener, hacer y estar, de carácter individual y colectivo, conducentes a la actualización de las mismas necesidades. Los bienes económicos, por último, son objetos y artefactos que permiten afectar la eficiencia de un satisfactor, alterando así el umbral de actualización de una necesidad, ya sea en sentido positivo o negativo. En este punto, como bien lo expresa Max-Neef (1994):

La construcción de una economía humanista exige, en este marco, un importante desafío teórico, a saber: entender y desentrañar la dialéctica entre necesidades, satisfactores y bienes económicos. Esto, a fin de pensar formas de organización económica en que los bienes potencien satisfactores para vivir las necesidades de manera coherente, sana y plena (p. 51).

Bajo este enfoque de desarrollo, es posible imaginar diferentes escenarios y reglas que posibiliten una intervención del territorio diferente a los desarrollos económicos tradicionales del territorio, que ameritan un modelado para diferentes visiones, compatibles con un desarrollo a escala humana.

### **Mojana: un caso de estudio**

Para ilustrar lo expuesto, se presenta a continuación un resumen del modelo Mojana, que se trata de un ejercicio exploratorio en su versión preliminar, cuyo objetivo fue analizar, desde una óptica evolutiva, las dinámicas del territorio de la ecorregión de la Mojana, localizada en jurisdicción de los departamentos de Sucre, Bolívar, Córdoba y Antioquia (Colombia). Dicha zona resulta de especial interés debido a su condición de delta hídrico interior, que la ha convertido en un territorio de gran riqueza ambiental, lo cual contrasta con los elevados niveles de pobreza y la baja eficiencia de las instituciones públicas.

En el modelo se puede observar la influencia que ejercen los periodos de inundación en los grupos sociales y en el territorio. Para ello, los agentes fueron caracterizados según su condición de habitar

(i. e., anfibio o agrícola), su temporalidad en el territorio (i. e., buscador o asentado) y su clase social (i. e., alta, media y baja).

Además, los agentes integran rutinas de búsqueda, asentamiento, cultivo, reproducción y adaptación que les permiten interactuar con el territorio y entre ellos mismos.

Mojana trata de integrar tres submodelos: territorio, agentes e inundación (véase la figura 2), y de este modo permite simular fenómenos naturales, sociales y su interacción. Su construcción se realizó con base en la teoría Blind Variation Selection Retention (BVSR) propuesta por Campbell (1974), articulando los niveles micro, meso y macro de acuerdo con la propuesta de Dopfer (2004); los resultados evidencian la versatilidad de la aplicación en el modelado de sistemas complejos que cambian en el tiempo.

El territorio está modelado como un autómatas celular cuyas celdas albergan un valor (i. e., *grain-here*) que representa la riqueza de dicha unidad territorial, medida no solo en términos de recursos naturales, sino también en elementos humanos como infraestructura y servicios, entre otros.

El territorio tiene capacidad de regeneración, por tanto, la cantidad de grano que se consume puede ser recuperada en el tiempo.

Las poblaciones humanas están representadas por un sistema de agentes que toman provecho del territorio para mejorar su riqueza acumulada <sup>4</sup>(i. e., variable *wealth*); sin embargo, la no adaptación puede degradarla. La interacción de los agentes con el territorio conlleva al mejoramiento o empobrecimiento de este.

Otro autómatas celular simula una inundación que se produce periódicamente. El nivel de agua (i. e., variable *water*) en las unidades territoriales puede ser atractivo o repulsivo para los agentes. Dependiendo de la adaptación del agente al agua, esta degrada o no su bienestar.

La presencia periódica de la inundación, la capacidad de regeneración y modificación del territorio, sumadas a la posibilidad de cambio en los agentes hacen que Mojana se caracterice por exhibir un entorno variante en el tiempo.

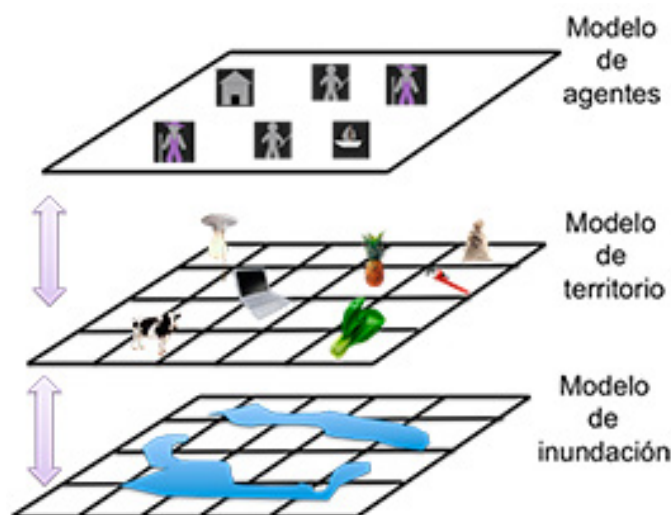


Figura 2. Submodelos Mojana

Fuente: Melgarejo, Pérez & Villegas, 2014.

<sup>4</sup> Por riqueza acumulada se entiende la cantidad de grano que acumula el agente y puede ser representada no solamente en términos económicos, sino también en términos de bienestar.





Los atributos que tienen los agentes se presentan en la tabla 3 y están relacionados con la edad, la cantidad de riqueza,

la esperanza de vida y las características que toman a lo largo de su vida.

**Tabla 3.** Atributos de los agentes en Mojana

<i>Atributo</i>	<i>Descripción</i>
Age	Edad del agente
Wealth	Cantidad de riqueza que un agente tiene
Life-expectancy	Máxima edad que un agente puede llegar a tener
Metabolism	Cantidad de riqueza que un agente puede llegar a consumir
Stay-counter	Tiempo de establecimiento de un agente en una parcela
Patience-counter	Tiempo de búsqueda de un agente
Speed	Velocidad del agente

*Fuente: propia del proyecto.*

Dentro del modelo Mojana se consideran dos tipos de agentes que emulan el comportamiento de la población en la ecorregión: agrícolas y anfibios. Al comienzo, el sistema inicializa el número total de agentes (agrícolas y anfibios) para cada uno de los cuales las rutinas son las mismas por población (i. e., buscar, moverse, asentarse, reproducirse y morir).

La principal diferencia entre los dos tipos de agentes consiste en que el proceso de asentarse depende de la condición del territorio (i. e., seco o inundado).

Las rutinas están predefinidas en función de la riqueza de las parcelas; no obstante, su incremento y estabilidad dependen adicionalmente de la velocidad de búsqueda y de la riqueza acumulada. Asimismo, estas últimas dan lugar a la con-

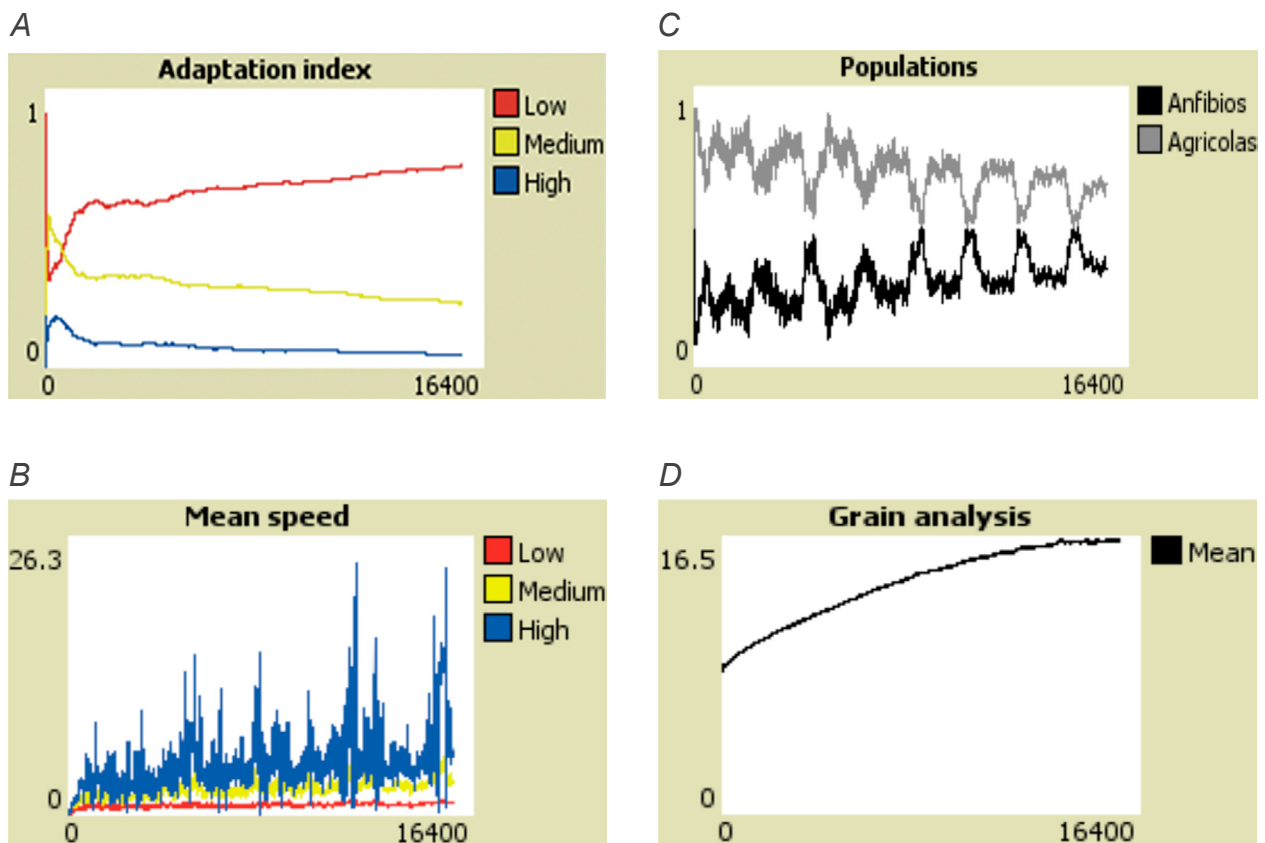
figuración de tres clases sociales: alta, media y baja. Cuando el tiempo de búsqueda de un agente se agota, este puede cambiar su condición de anfibio a agrícola o viceversa. El agotamiento es función de presiones selectivas del ambiente sobre el agente. Algunos de los resultados y de los comportamientos observados en el modelo Mojana se resumen a continuación.

En la figura 3 se observan las gráficas de Mojana luego de una simulación de 16.400 generaciones, donde *A* muestra que el índice de adaptación para la clase económica baja (en el modelo), luego de ser inicializado, crece para mantenerse por encima de las demás clases sociales; esta característica se mantuvo constante para diferentes condiciones iniciales del modelo. En la gráfica *B* se aprecia que las velocidades promedio de las clases

sociales, aunque varían en el tiempo, muestran tendencias claramente establecidas, donde la clase baja es la más lenta y la clase alta es la más rápida.

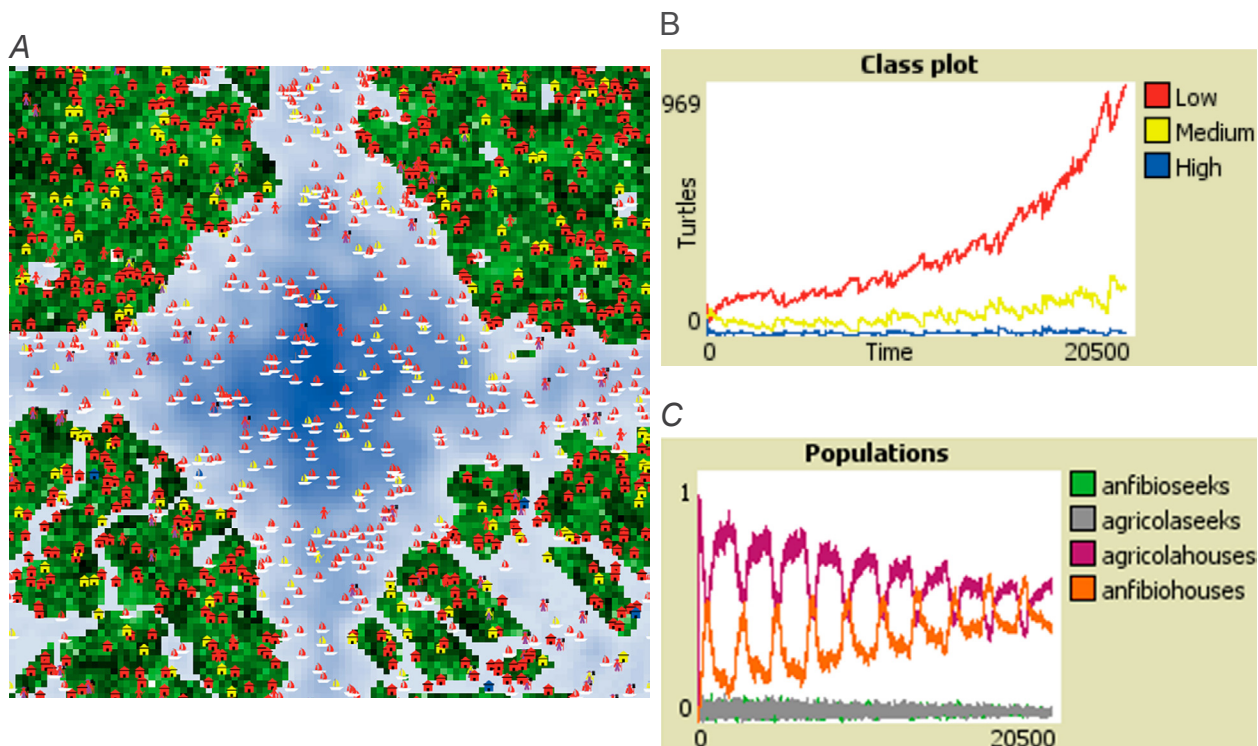
En C es posible percibir que aunque los tipos de población anfibios y agrícolas fluctúan (en función de las inundaciones), se nota una tendencia a la confluencia.

Por otra parte, de la gráfica D se concluye que, a pesar de lo que se esperaría, la cantidad de grano (riqueza) en el modelo aumenta con el tiempo. Lo anterior permite percibir que a través de variaciones ciegas o no teleológicas de las condiciones del modelo emergen tendencias y estructuras difícilmente apreciables en otro escenario de simulación.



**Figura 3.** Variación y adaptabilidad en Mojana:  
a) índice de adaptación; b) velocidad promedio por clase social; c) tamaño de las poblaciones en el tiempo; d) cantidad de grano en el tiempo  
*Fuente: propia del proyecto.*





**Figura 4.** Evolución de la cantidad de agentes: a) en el territorio; b) por clases sociales y c) por tipos. Lluvia *rainfall* = 0,15.

Fuente: propia del proyecto.

En la figura 4, gráfica B, se observa cómo la clase social baja predomina con el paso del tiempo. En C se observa cómo predominan los pobladores agrícolas asentados, dado que existe mayor cantidad de territorio sin agua. Un comportamiento similar tiene actualmente la región, donde los niveles de pobreza son muy altos, reflejados en un NBI promedio de 64,4 con una cantidad de terratenientes baja.

### ***Sobre los datos y atributos de un modelado integrado para la visión de territorio (ejemplo caso Mojana)***

Es preciso aclarar que la ecorregión de la Mojana se trata aquí a manera de

ejemplo porque en ella ya se inició un proceso exploratorio; sin embargo, los posibles casos de estudio son diversos y pueden estar ubicados en diferentes regiones del país, dentro de los cuales hay algunos de interés particular debido a su localización, sus problemáticas, su complejidad y la disponibilidad de información:

- El tema de la calidad de la vivienda en Ciudad Bolívar y Usme en Bogotá.
- La explotación minera y agrícola en la cuenca alta del río Chicamocha en Boyacá.
- Los efectos del cambio de normatividad de uso del suelo en el desarrollo de las unidades de planeamiento zonal de Calandaima y Usaquén en Bogotá.



## Datos

En Mojana, por ejemplo, la información asociada a los recursos en las parcelas y el territorio en general, las lluvias y las inundaciones, deberá ser soportada en una cartografía, un modelo digital del terreno y un SIG que permita la georreferenciación de la información actualizada (tanto de los procesos biofísicos como humanos) y la operación de los agentes (población).

## Variables

Particularmente en Mojana, las variables están orientadas a simular los comportamientos de los individuos de los cuales se desprenden tendencias, procesos, fenómenos y relaciones que pueden ser observados desde el modelo, pero, igualmente, las variables podrían estar orientadas a describir fenómenos de otros tópicos de interés.

## Conclusiones

- En Mojana se logró la compaginación de las diferentes escalas espaciales para

el territorio, la inundación y la actuación de los agentes a través de la parcela como unidad de observación. En el caso de la escala temporal, también se logró sincronizar las resoluciones temporales para territorio y agentes, mientras que para las inundaciones se requiere una mejor articulación, que puede ser incorporada mediante el uso de series de tiempo de lluvias, por ejemplo.

- El modelo permite percibir reglas y comportamientos emergentes ocultos, que no se hacen evidentes en las condiciones iniciales.
- Los sistemas basados en agentes resultan ser una herramienta útil para la generación de escenarios en el marco de la planeación participativa y en la toma de decisiones.
- Este ejercicio de simulación abrió la ventana de una perspectiva diferente al análisis de sistemas sociales desde la ingeniería, dado que provee un marco de entendimiento algorítmico y soportado en procesos.





## Bibliografía

---

---

- Agarwal, C., Green, G., Grove, J., Evans, T. & Schweik, C. (2002). *A Review and Assessment of Land-Use Change Models: Dynamics of Space, Time, and Human Choice*. Gen. Tech. Rep. NE-297. Newtown Square, PA: U.S. Department of Agriculture (USDA), Forest Service, Northeastern Research Station. Recuperado de [http://www.wgianalytics.net/wgitransport/docs/comparisons/USDA\\_Review.pdf](http://www.wgianalytics.net/wgitransport/docs/comparisons/USDA_Review.pdf).
- Berkes, F. & Folke, C. (1998). Linking social and ecological systems for resilience and sustainability. En Berkes, F. y Folke, C. (Eds.). *Linking social and ecological systems: management practices and social mechanisms for building resilience* (pp. 1-26). Cambridge, UK: University Press.
- Campbell, D. (1974). Evolutionary Epistemology. In: Schilpp, P. (Ed.), *The Philosophy of Karl Popper* (vol. 1, pp. 413-463). La Salle, IL: Open Court.
- Dopfer, K. (2004). The economic agent as rule maker and rule user: *Homo Sapiens Oeconomicus*. *Journal of Evolutionary Economics*, 14(2), 177-195. doi:10.1007/s00191-004-0189-9.
- Dopfer, K., Foster, J. & Potts, J. (2004). Micro-meso-macro. *Journal of Evolutionary Economics*, 14(3), 263-279. doi:10.1007/s00191-004-0193-0.
- Dopfer, K. (2005). Evolutionary economics: A theoretical framework. In K. Dopfer (Ed.), *The Evolutionary Foundations of Economics* (pp. 3-55). Cambridge: University Press.
- Epstein, J. M. (2008). Why Model? *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 11(4). Recuperado de <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/12.html>.
- Heidegger, M. (1975). Construir, habitar, pensar. *Revista Teoría*, 5-6, 150-162. Recuperado de <http://www.revistateoria.uchile.cl/index.php/TRA/article/viewFile/41564/43080>.
- Koen, B. V. (2003). Some thoughts on engineering; The principal rule of the engineering method. In: *Discussion of the Method* (pp. 7-58). New York: Oxford University Press.
- Kroes, P. (2012). Engineering design. In: P. Kroes (Ed.), *Technical Artefacts: Creations of Mind and Matter* (pp. 127-161). Dordrecht: Springer.



Lapointe, G. (1998). Human nature, humanistic social systems and design. *Systems Research and Behavioral Science*, 15(3), 193-208. doi:10.1002/(SICI)1099-1743(199805/06)15:3<193::AID-SRES221>3.0.CO;2-A.

Max-Neef, M. (1994). *Desarrollo a escala humana: conceptos, aplicaciones y algunas reflexiones*. Barcelona: Icaria. Recuperado de [https://www.max-neef.cl/descargas/Max\\_Neef-Desarrollo\\_a\\_escal\\_a\\_humana.pdf](https://www.max-neef.cl/descargas/Max_Neef-Desarrollo_a_escal_a_humana.pdf).

Melgarejo M. A., Pérez E. R. & Villegas P. A. (2014). *Modelo organizacional jerárquico de agentes naturales del agua*. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana (pendiente de publicación).

Nelson, R. & Winter, S. (1982). *An Evolutionary Theory of Economic Change*. Cambridge, MA: Belknap/Harvard University Press.

Petroski, H. (1999, Oct. 19). Why No Engineering Nobel? *Asian Wall Street Journal*, 21, p. 6.

Petroski, H. (2009, Jan. 25). Want to Engineer Real Change? Don't Ask a Scientist. *Washington Post*, Outlook Section, p. B4.

Voinov, A. & Bousquet, F. (2010). Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling & Software*, 25(11), 1268-1281. <http://doi.org/10.1016/j.envsoft.2010.03.007>.

### **Bibliografía consultada**

Ackoff, R. & Gharajedaghi, J. (1996). Reflections on systems and their models. *Systems Research and Behavioral Science*, 13(1), 13-23.

Bello, A. (2004). *Etnicidad y ciudadanía en América Latina. La acción colectiva de los pueblos indígenas*. Santiago de Chile: CEPAL. Recuperado de <http://www.cepal.org/mujer/noticias/noticias/9/26089/libroetnicidadciudadania.pdf>.

Chayanov, A. (1974). *La organización de la unidad económica campesina*. Buenos Aires: Nueva Visión.

Heidegger, M. (2009). *Ser y tiempo*. Madrid: Trotta.







---

---

Jakeman, A. J. & Letcher, R. A. (2003). Integrated assessment and modelling: features, principles and examples for catchment management. *Environmental Modelling & Software*, 18, 491-501. Recuperado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.90.5792&rep=rep1&type=pdf>.

Johansen, O. (1992). *Introducción a la teoría general de sistemas*. México: Limusa.

Letcher, R., Jakeman, A., Barreteau, O., Borsuk, M., Elsworth, S., Hamilton, S., Henriksen, H. J., Kuikka, S., Maier, H., Rizzoli, A. E., Van Delden, D. & Voinov, A. (2013). Selecting among five common modelling approaches for integrated environmental assessment and management. *Environmental Modelling & Software*, 47, 159-181.

Miguel, A. (2011). *La teoría de la complejidad y el caos en la ciencia regional*. Oaxaca: Instituto Tecnológico de Oaxaca.

Oakes, T. (1997). Place and the paradox of modernity. *Annals of the Association of American Geographers*, 87(3), 509-531. Recuperado de <http://spot.colorado.edu/~toakes/Paradox.pdf>.

Sack, R. (1986). *Human territoriality: its theory and history*. Cambridge: University Press.

Schwaninger, M. (2010). Model-based management (MBM): a vital prerequisite for organizational viability. *Kybernetes*, 39(9/10), 1419-1428. Recuperado de [https://www.alexandria.unisg.ch/209537/1/222\\_Model-based\\_management\\_Kybernetes%202010.pdf](https://www.alexandria.unisg.ch/209537/1/222_Model-based_management_Kybernetes%202010.pdf).



## Un sistema de administración de tierras flexible con enfoque al ciudadano

*A flexible land administration system focusing the citizens*

Ivonne Moreno Horta<sup>1</sup>

“Cómo citar este artículo: Moreno Horta, I. (2017). Un sistema de administración de tierras flexible con enfoque al ciudadano. *Análisis Geográficos*, 52, 53-62.

### Resumen

Existen movilizadores globales sobre el acceso, el uso y la propiedad de las tierras, marcados por las presiones sobre los recursos naturales, en especial con las tendencias de explotación minero-energética en Latinoamérica, la rápida urbanización, la necesidad de reubicación por desastres naturales, la demanda de tierra para la producción de alimentos y de biocombustibles, la globalización del mercado de tierras, la adquisición de tierras a gran escala y los impactos de las grandes inversiones privadas en suelo rural sobre las comunidades locales. En Colombia existe un ingrediente adicional, y es la histórica presencia de conflictos de propiedad y uso, tanto del suelo como del subsuelo, que afectan, con mayor impacto a nivel local y regional, el ejercicio de la territorialidad de las instituciones y comunidades, generando, entre otros, despojos y abandonos forzados de la tierra. Ante este panorama, ¿cuál es el papel del Estado? ¿Cómo responder de manera oportuna y eficiente a estas problemáticas, fuerzas y cambios sobre el manejo, uso y acceso de las tierras públicas (baldíos) y privadas?

Frente a las presiones globales sobre la tenencia, el uso y el manejo de los recursos, la información actualizada sobre la situación legal y de realidad del manejo de las tierras en terreno, desagregada a nivel predial, es indispensable para que tanto el ciudadano como el Estado puedan tomar decisiones oportunas. En este sentido, se deben construir, actualizar y mantener registros institucionales de las tierras que superen los sistemas de información aislados y den el paso a plataformas capaces de facilitar el intercambio de información entre diferentes fuentes, formatos y organizaciones.

**Palabras clave:** administración de tierras, seguridad de tenencia, catastro y registro.

<sup>1</sup> Consultora internacional en administración de tierras, víctimas y postconflicto, Bogotá, Colombia. Correo: [moreno\\_horta@yahoo.com](mailto:moreno_horta@yahoo.com).



## **Abstract**

*There are global trends to access, to use and to secure land ownership, defined by pressures on natural resources, such as mining and oil exploitation; on land for rapid urban urbanization; on re-settlement and reallocation as a result of natural disasters; and on land for food and biofuel productions. In addition to it, lands markets are globalized and there is a tendency to acquire lands at large scale, and to have large private investments, creating impact on rural and local communities. In the Colombian case, the historical conflicts related to land ownership, to land access, to land use and to subsoil resources exploitation, affected institutions and communities particularly at local level, generating land seizing and forced abandonment of land. Within such context, what is the role of government? How to act timely and efficiently to respond to the described forces and trends, while achieving an efficient land management for both, private and public lands?*

*To face such global pressures, updated and relevant parcel based information is compulsory to get to know beyond the legal status, the ground situation and context on land tenure. Information is essential for both citizens and governments to make assertive decisions, in this sense, efforts should concentrate towards the building, upgrading and maintenance of official and interoperable land records and platforms, overcoming isolated information systems and allowing information exchange, analysis and retrieving, regardless the data sources, the formats and the producer organization.*

**Keywords:** *land administration, holding security, cadaster and register.*



## Introducción a la administración de tierras

La relación ser humano-tierra es altamente dinámica y está marcada por incrementales presiones de acceso y uso al suelo y sus recursos. No es solamente la clásica dicotomía entre las presiones ambientales y un desarrollo sostenible; en un mundo globalizado, el mercado de tierras tiene presiones provenientes de grandes compradores de tierras transnacionales y nacionales, de intereses inversionistas sobre tierras con derechos consuetudinarios por parte de comunidades campesinas y étnicas, y de intereses de los mismos estados y gobiernos en los ámbitos nacionales y territoriales. Para manejar esta relación se encuentra la administración de tierras, porque facilita la gerencia del suelo para:

- Producción agropecuaria y seguridad alimentaria.
- Fuentes de energía: recursos minero-energéticos y energías alternativas.
- Oferta de bienes ambientales: agua, importancia de los bosques en la mitigación del cambio climático, producción forestal.
- Vivienda y bienes e infraestructura pública.
- Mitigación de los conflictos en las áreas marcadas por estos.

La administración de tierras tiene como eje nodal la seguridad jurídica de la tenencia y la protección de los derechos sobre la tierra, para lo cual necesita producir y

acceder a información relevante, segura y actualizada, un arreglo institucional adecuado que tenga en cuenta el sector privado y un marco legal y procedimental flexible y eficiente en materia de burocracia, pasos, costos y tiempos. La seguridad de tenencia es el pivote por sus beneficios, tanto para el Estado como para el ciudadano.

### *Para el Estado:*

- La propiedad formal facilita la fijación de capital activo, en la medida en que el paulatino mejoramiento de los sistemas de propiedad permite la formación y acumulación de capital, en lo que se considera como “una verdadera reforma macroeconómica” (De Soto, 2005).
- Facilita y disminuye el costo de las transacciones de capital e inmobiliarias, al contar con mayor seguridad respecto de las mismas y con seguridad y oponibilidad frente a terceros.
- Previene y mitiga los conflictos alrededor de los derechos de tenencia.
- Facilita el manejo y gerencia de uso sobre la tierra y los recursos naturales.

### *Para los ciudadanos:*

- La tierra aumenta su valor y se disminuyen las asimetrías en las transacciones.
- Genera mayores incentivos para la inversión y coadyuva para el acceso al sistema financiero y al crédito.
- Facilita la realización de los derechos económicos y sociales.



- Promueve y mitiga la exacerbación de conflictos (no solo en situaciones de posconflicto, sino también en contextos de alta conflictividad rural histórica).
- En cuanto a los pueblos o comunidades étnicas, facilita el ejercicio de su territorialidad de acuerdo a usos y costumbres, y brinda herramientas a la comunidad para prevenir afectaciones, expoliaciones o usos inadecuados de los recursos ambientales.
- Finalmente, una compilación de estudios del Banco Mundial (Deininger, 2003) evidencia que la seguridad en la tenencia, en cabeza de ambos miembros de la pareja, protege el patrimonio familiar en beneficio de los hijos, y que un mayor control de las mujeres sobre bienes patrimoniales tiende a traducirse en mayores niveles de inversión en la educación, la salud y la alimentación, que benefician a los niños.

## Procesos, instituciones y arreglos normativos a la medida

Los sistemas de administración de tierras y seguridad de tenencia deben diseñarse a la medida y ajustarse a los propósitos de cada país y contexto, partiendo de las necesidades de los ciudadanos, bajo la premisa de registrar en bases de datos institucionales las diferentes formas de tenencia, y no solamente la formal y legalmente constituida. En casos como el colombiano, donde se ha dado una prevalencia al ingreso en las bases de datos institucionales del derecho de propiedad y no de las demás formas de tenencia, la información oficial dista de la realidad en terreno y no permite contar con datos

necesarios para la formulación de las políticas públicas de tierras, al desconocer cifras del universo de la informalidad, los tipos de la misma, los tamaños de los predios y los usufructos, y el inventario de predios del Estado y de la nación, entre otros.

Adicional a la disponibilidad de información, el marco legal y el arreglo institucional, las instituciones deben permitir procedimientos flexibles y graduales. Esto se refiere a la precisión adecuada en cuanto a la identificación, localización y georreferenciación de los predios, a la identificación de la familia sujeto de derechos patrimoniales y al ingreso de los diferentes tipos de derechos sobre la tierra sin esperar a tener todo titulado. En caso de conflictos, también es importante su inventario y registro, previo o paralelo a su resolución; y en cuanto a las tierras del Estado, previo a su titulación o concesión, es clave registrar su usufructo.

Al analizar específicamente los procesos y procedimientos usados para inventariar y registrar la propiedad inmueble, estos deben diseñarse y adecuarse a los principios de mejora continua, eficacia en materia de recursos, costos y tiempos y, por lo tanto, reducción de trámites. En contextos donde existe información institucional actualizada sobre la situación de tenencia, los trámites son distintos a aquellos donde son las relaciones y el reconocimiento entre los vecinos y la comunidad los que marcan el contexto de tenencia. Es por esto que los procedimientos innovadores, como la combinación de mecanismos comunitarios, administrativos y judiciales para la titulación, se hacen necesarios para agilizar la actuación estatal.



## REGISTRANDO LA TENENCIA

### ✓ Flexibilidad (en el registro de quién tiene qué):

- **Identificación del qué:** El predio/territorio: precisión, de información geo-espacial
- **Identificación del quién:** Personas, sujeto de derechos: cónyuges, sujetos colectivos.
- **Identificación del tipo de derecho:** Completo/Incompletos, usufructo

**Necesidades de los ciudadanos**



### **Flexibilidad**

- **Marco legal**
- **Marco Procedimental**

**Figura 1.** Registrando la tenencia  
Fuente: elaboración propia.

Los trámites entre instituciones pueden demorar aún más los procedimientos, por tanto, es recomendable: 1) que participe el mínimo número de autoridades administrativas; 2) que se privilegien procesos declarativos con amplia divulgación; 3) que tengan efectos probatorios los testimonios de vecinos y 4) que se surta la conciliación de controversias para minimizar la presión sobre los despachos judiciales.

Es recomendable, como se ha expuesto, inventariar y guardar en registros oficiales los diferentes tipos de tenencia, ya sea que se trate de derechos formales o informales, y actualizar las bases de datos en la medida en que las transacciones y los procedimientos de titulación faciliten alcanzar la seguridad jurídica de la propiedad y del usufructo.

La gerencia de tierras debe ser incluyente

y participativa, por lo cual en el caso de grupos vulnerables como las comunidades étnicas y en cuanto los derechos de tenencia de las mujeres, en especial las rurales, se deben desarrollar procedimientos y mecanismos que faciliten su participación y el reconocimiento de sus derechos. Esto involucra jornadas de servicios en terreno que permitan el acceso y el acercamiento del Estado a la comunidad, horarios flexibles, servicios en lenguas locales y jornadas de divulgación y sensibilización sobre sus derechos sobre la tierra.

El *análisis de costos* es fundamental para determinar soluciones eficaces en materia de administración de tierras y seguridad de tenencia, y hay que considerar tres tipos de costos: 1) los registrales y catastrales, 2) los inherentes al proceso de titulación y 3) los de transacción en los que incurre el ciudadano.





Estos son:

Costos registrales y catastrales:

- Geodesia
- Levantamiento catastral
- Análisis jurídico e inscripción registral

Costos de titulación:

- Divulgación del proceso y acercamiento comunitario
- Procesos administrativos y judiciales

Costos de transacción para el ciudadano, tales como:

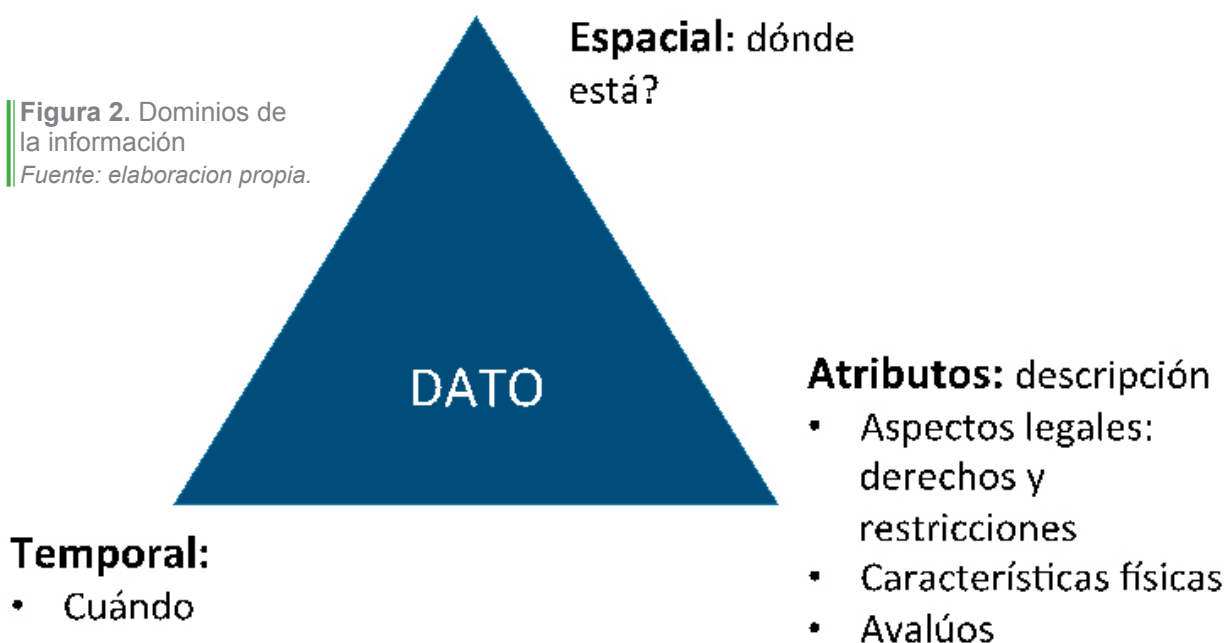
- Viajes de acceso a las oficinas donde se realizan los trámites
- Costo de oportunidad, al dejar de laborar, para adelantar trámites y transacciones

La disminución de estos costos permite alcanzar procedimientos más efectivos y, en

general, se recomienda: evaluar el tiempo para completar la transacción, determinar los costos, paso a paso, del proceso de titulación, y no repetir trámites. Por ejemplo, es común que los levantamientos derivados del censo catastral no sean, por diferentes motivos, usados para el proceso de titulación, de modo que el Estado y, a la larga, el ciudadano, asumen el doble costo de la individualización de cabida y linderos de su predio. Si el levantamiento catastral no puede ser la base para la titulación, urge realizar reingenierías a ambos procesos para trabajar en lógicas de economía procesal, donde la información se retroalimenta y facilita la gerencia de tierras.

En lo que respecta a la *información*, el dominio legal (alfanumérico), gráfico (espacial) y temporal (el cuándo) son complementarios (figura 1), ya que, si hay desarticulación de fuentes y parámetros de información predial, el ciudadano se enfrenta a sistemas disfuncionales donde

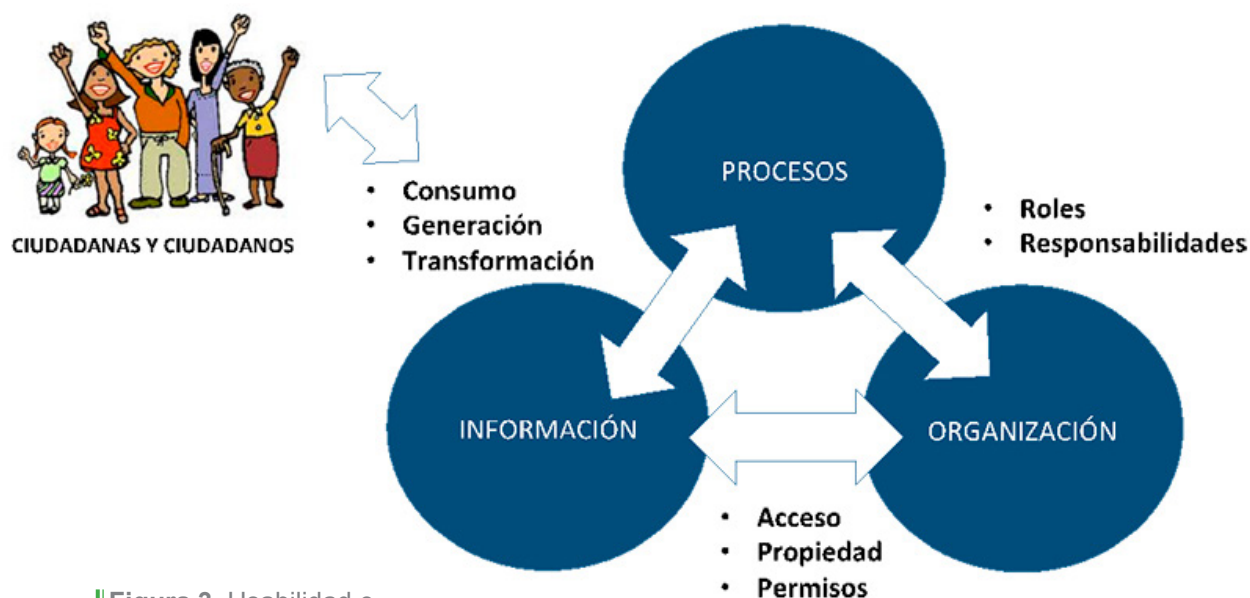
**Figura 2.** Dominios de la información  
*Fuente: elaboración propia.*



es necesario dirigirse a dos o más autoridades para realizar su transacciones, y se presentan un alto grado de inconsistencias porque cada entidad tiene diferentes propósitos en la recolección y el mantenimiento de la información, esto sin mencionar la redundancia, que aumenta los costos de almacenamiento, mantenimiento y actualización de las bases de datos y, en general, de los sistemas de información.

Las dimensiones a considerar en el diseño de sistemas de información para la administración de tierras son:

- Actualización y mantenimiento: ¿quién está a cargo? ¿Cada cuánto? Determinación de procesos para el mantenimiento de los datos espaciales, temporales y atributos.
- Escala: ¿cuál es la mínima unidad espacial? ¿Es posible agregar la información a nivel municipal? ¿Y del nivel municipal hacia abajo?
- Usabilidad e interoperabilidad: no tiene que ser un único sistema de información. Plataformas capaces de facilitar el intercambio de información entre diferentes fuentes, formatos y organizaciones para diferentes servicios (figura 2).



**Figura 3.** Usabilidad e interoperabilidad de la información  
Fuente: elaboración propia.



## La administración de tierras en función de los ciudadanos

El arreglo institucional para una efectiva gerencia y administración de tierras parte de un enfoque hacia al ciudadano, como clave del buen gobierno. Esto denota un cambio de paradigma que supere al Estado en el centro, alrededor del cual gravitan diversas entidades no interrelacionadas funcionalmente entre sí, como lo muestra la figura 3, a unas instituciones que están en función del ciudadano (figura 4).

Para esto, es necesario analizar funcional y espacialmente el acceso a los servicios por parte de los ciudadanos:

- ¿Existen oficinas en todas las municipalidades o solo en las principales ciudades?

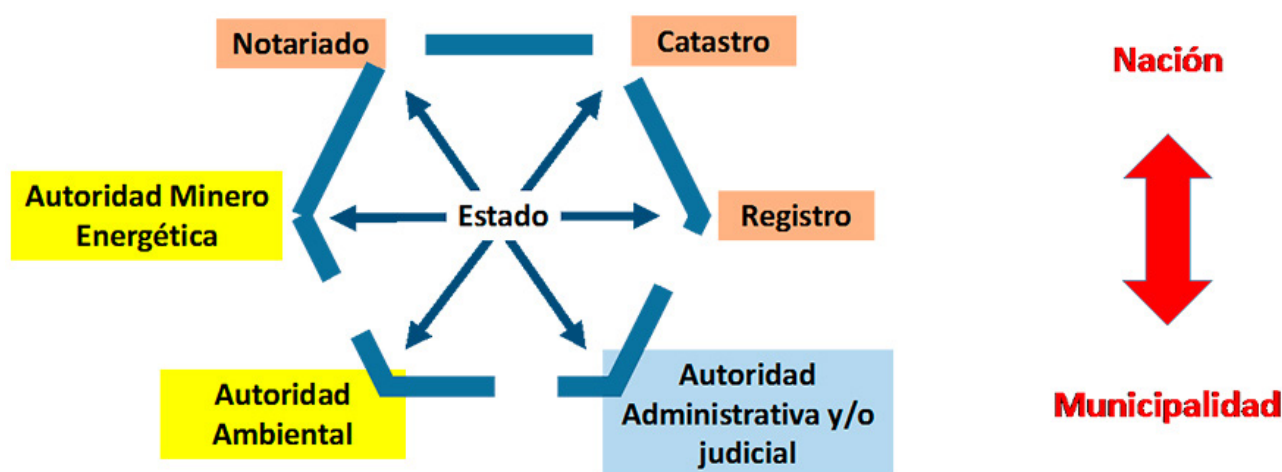
- ¿Son accesibles las oficinas para los habitantes rurales?

- ¿Tienen presencia local todas las instituciones involucradas en los procesos de administración de tierras y titulación?

Existen diversas alternativas para acercar el Estado al ciudadano, como son:

- Oficinas móviles.
- Ventanilla única para acceder a varios servicios e instituciones desde un solo punto.
- Alianzas público-privadas que faciliten el acceso por parte de los ciudadanos.

Adicionalmente, existen prácticas que facilitan una mejor actuación de la administración, como son:



**Figura 4.** Antiguo paradigma de arreglo institucional  
Fuente: elaboración propia.



**Figura 5.** Nuevo paradigma de arreglo institucional  
Fuente: elaboración propia.

- Intercambio de información, bajo principio de hábeas data.
- Tercerización (*outsourcing*) de servicios cartográficos, de medición, de control de calidad, notariales, de tecnologías de la información y de sistemas de información.
- No hay soluciones únicas replicables entre países, es necesario analizar en qué casos la participación del sector privado ayuda a la efectividad del sistema.

## Conclusiones

Se necesita, de manera urgente, desarrollar ajustes en materia normativa, institucional y procedimental que permitan la estructuración de un sistema de administración de tierras que integre los temas registrales, catastrales y de tenencia, y que permita la identificación, el seguimiento y el análisis de las dinámicas de propiedad, usufructo, uso y ocupación de las tierras públicas y privadas. Todo esto, bajo dos ejes nodales: 1) responder a las

necesidades de los ciudadanos de conocer quién tiene qué pedazo de tierra, quién la tenía, cómo se accede, qué usos se le puede dar y cuáles son los trámites a surtir para acceder a la misma; y 2) responder a las necesidades del Estado en materia de ejecución de políticas públicas que permitan un mejor acceso a la propiedad de la tierra, a su usufructo y a políticas de direccionamiento y localización (espacialización) de los usos y actividades productivas.

El sistema de administración de tierras debe ser flexible en cuanto a las precisiones necesarias del levantamiento predial; incluyente de las diferentes formas de tenencia, desarrollado de manera participativa con las comunidades para minimizar los conflictos de linderos; costeable y sostenible para actualizarse en el tiempo y para contar con información en tiempo real y confiable; y con políticas de acceso público a información básica sobre la tenencia de la tierra, todo bajo un enfoque que tenga al ciudadano como cliente y centro de los rediseños y soluciones, en un proceso de mejora continua.







## Bibliografía

Deininger, K (2003). *Land policies for growth and poverty reduction*. Oxford: World Bank, Oxford University Press. Recuperado de [http://documents.worldbank.org/curated/en/485171468309336484/310436360\\_20050007001644/additional/multi0page.pdf](http://documents.worldbank.org/curated/en/485171468309336484/310436360_20050007001644/additional/multi0page.pdf).

De Soto, H. (2005). *El misterio del capital: ¿por qué el capitalismo triunfa en Occidente y fracasa en el resto del mundo?* Bogotá: Planeta.

### Bibliografía consultada

Borras, S., Franco, J., Kay, C. & Spoor, M. (2011). *El acaparamiento de tierras en América Latina y el Caribe, visto desde una perspectiva internacional más amplia*. Santiago de Chile: FAO. Recuperado de [http://www.fao.org/fileadmin/user\\_upload/rlc/eventos/229269/borras.pdf](http://www.fao.org/fileadmin/user_upload/rlc/eventos/229269/borras.pdf).

International Federation of Surveyors (FIG) (2014). *Fit-For-Purpose Land Administration*. FIG Report No. 60. Copenhagen: FIG, World Bank. Recuperado de <http://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub60/Figpub60.pdf>.

International Federation of Surveyors (FIG) (2014). *Cadastre 2014 and Beyond*. Steudler (Ed.). FIG Report No. 61. D. Copenhagen: FIG. Recuperado de <https://www.fig.net/resources/publications/figpub/pub61/Figpub61.pdf>.

Lee, K. & Romary, L. (Jan., 2010). *Towards interoperability of ISO Standards for language resource management*. Ponencia presentada en la 2º International Conference on Global Interoperability for Language Resources (ICGL), Hong Kong SAR China. Recuperado de <https://hal.inria.fr/inria-00441562/document>.



## Conduciendo la información estadística georreferenciada del DANE a otra dimensión

### *Leading to DANE's georeferenced statistic information to other dimension*

Luis M. Vilches-Blázquez<sup>1</sup>, Julián Mauricio Alvarado Torres<sup>2</sup>

“Cómo citar este artículo: Vilches-Blázquez, L. y Alvarado Torres, J. (2017). Conduciendo la información estadística georreferenciada del DANE a otra dimensión. *Análisis Geográficos*, 52, 63-73.

### Resumen

La web Linked Data supone un nuevo paradigma que pretende explotar la web como un espacio global de información. La aplicación de los principios de esta nueva web a la información estadística georreferenciada del DANE permitirá superar las barreras actuales en los procesos de publicación ortodoxa, logrando una integración e interoperabilidad semántica de los datos.

En este trabajo se presentan las características de un caso de estudio para la generación y publicación de datos estadísticos georreferenciados conforme a Linked Data. Este prototipo representa los cimientos para la integración de datos abiertos gubernamentales, conjuntos de datos heterogéneos de la web Linked Data y los procesos de innovación que van a caracterizar al DANE moderno.

**Palabras clave:** información estadística georreferenciada, Web 3.0, integración, Linked Data, innovación.

### Abstract

*The Web of Linked Data is a new paradigm that enables to explode the Web as a global information space. The principles of Linked Data associated with DANE's geo-statistical information will enable to overcome current barriers in the information delivering process, and will reach a semantic integration and interoperability of data.*

*In this paper we present the characteristics of a study case for the generation and publication of geo-statistical data according to Linked Data. This prototype is the starting point for integrating Open Government Data, heterogeneous datasets of the Linked Data Web and the innovation processes of the modern DANE.*

**Keywords:** georeferenced statistical information, Web 3.0, integration, Linked Data, innovation.

<sup>1</sup> Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Dirección de Geoestadística, Bogotá, Colombia.  
Correo: lmvilches@dane.gov.co.

<sup>2</sup> Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Dirección de Geoestadística, Bogotá, Colombia.  
Correo: jmalvaradot@dane.gov.co.



## Introducción

La demanda de información estadística se está convirtiendo en una necesidad de primer orden como consecuencia del potencial de estos datos para facilitar los procesos de análisis vinculados a la toma de decisiones por parte de un amplio espectro de usuarios. Sin embargo, la débil estructuración y heterogeneidad en el nivel de detalle, formatos y vocabularios utilizados son problemas que trascienden cuando la producción de información estadística está centrada en las necesidades específicas de cada investigación. Ante esta situación, hoy en día resulta imperioso disponer de modelos comunes y fácilmente procesables de información.

El Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) está empeñado en aprovechar y explotar las ventajas y posibilidades de los más recientes y poderosos paradigmas de información. En este sentido, ha decidido poner en marcha un proyecto para combinar la información estadística georreferenciada con la iniciativa Linked Data. Esta iniciativa se refiere a una nueva forma de publicar y enlazar datos para representar información en la Web 3.0 (también conocida como web semántica), utilizando Resource Description Framework (RDF), un lenguaje para presentar información sobre recursos, propuesto por el Consorcio de la World Wide Web en el área de la web semántica. Así, la iniciativa Linked Data supone un nuevo paradigma que pretende explotar la web como un espacio global de información en el que la navegación se realiza a través de datos estructurados enlazados (Linked Data), en lugar de realizarse a través de documentos. De esta manera, los servicios de información estadística georreferenciada institucionales superan las barreras actuales

en los procesos de publicación ortodoxa, logrando una integración e interoperabilidad semántica de los datos.

En este trabajo se presentan las características de un caso de estudio para la generación y publicación de datos estadísticos georreferenciados conforme a Linked Data. Este prototipo constituye los cimientos para la integración de datos abiertos gubernamentales, conjuntos de datos heterogéneos de la web de Linked Data y los procesos de innovación que van a caracterizar al DANE moderno. Así, primero se presenta el *workflow* del proceso de transformación a Linked Data de la información estadística georreferenciada con la que se trabaja en este proyecto. Luego se describen los detalles del proceso de generación y publicación de Linked Data del DANE, y finalmente se exponen las conclusiones y trabajos futuros.

## **Workflow del proceso de transformación de la información estadística georreferenciada**

El desarrollo de *workflow* para la transformación de la información estadística georreferenciada del DANE a Linked Data se basa en la propuesta metodológica para la generación y publicación de datos estructurados entrelazados descrita por Sauer-*mann et al.* (2008). Esta guía metodológica propone un modelo de ciclo de vida incremental iterativo basado en continuas mejoras y extensiones del Linked Data generado. La referida metodología contempla las siguientes actividades: 1) especificación, 2) modelado, 3) generación de RDF, 4) generación de links, 5) publicación y 6) explotación. Cada una de estas actividades está compuesta de una o más tareas. La figura 1 muestra una visión



general de *workflow* del proyecto, asociado con las actividades que recoge la metodología mencionada.

A continuación se detallan los componentes que conforman el *workflow* del proyecto presentado en la figura 1. Cabe anotar que los componentes que se describen en este artículo son los que se han abordado en el contexto del proyecto hasta la fecha de presentación de este trabajo.

## Generación y publicación de Linked Data del DANE

Esta sección describe las diferentes actividades y tareas propuestas en el *workflow*, asociadas con la metodología utilizada por Vilches-Blázquez *et al.* (2014), realizadas durante el proceso de generación y publicación del proyecto Statistical Linked Data del DANE.

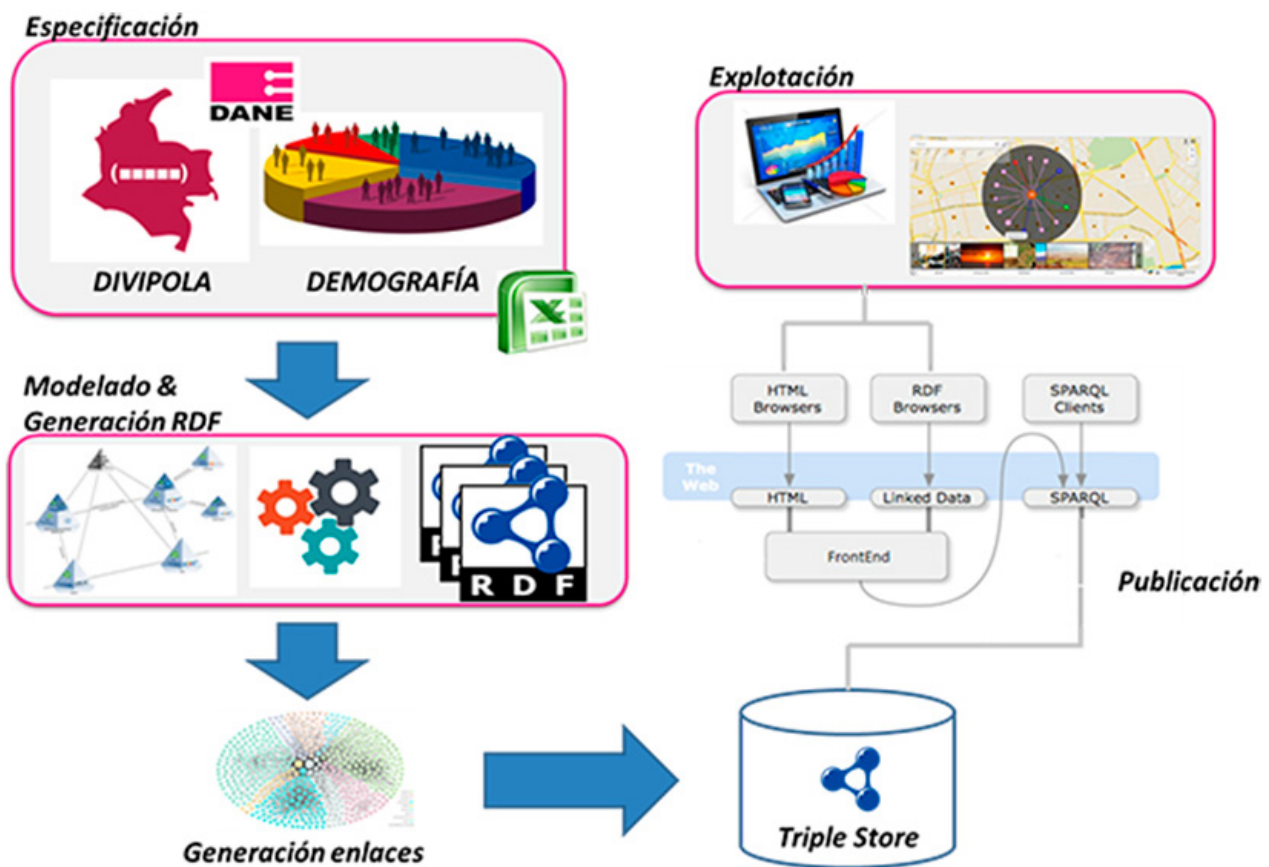


Figura 1. Workflow del proyecto Statistical Linked Data

Fuente: elaboración propia.





## **Especificación**

En esta sección se describe el análisis de las fuentes de datos que forman parte del proyecto, los patrones adoptados en el diseño de los identificadores de recursos (URI) y la definición de la licencia asociada a los datos.

### **Análisis de las fuentes de datos**

La información del DANE, utilizada para el desarrollo de este trabajo, está conformada por un conjunto de ficheros en formato Microsoft Excel que contienen datos sobre la división político-administrativa de Colombia (Divipola) y estadísticas relacionadas con demografía y población.

La Divipola es un estándar de codificación que permite contar con un listado organizado y actualizado de la totalidad de unidades en las que está dividido el territorio nacional, dándole a cada departamento, municipio, corregimiento departamental y centro poblado el máximo de estabilidad en su identificación.

Esta codificación, acorde con la dinámica territorial del país, está disponible en la web (DANE, 2015) y es actualizada periódicamente por el DANE de acuerdo con la información suministrada por las administraciones municipales y departamentales, constituyéndose en una fuente de consulta sobre la organización administrativa y política del país.

En relación con la información estadística asociada al tema demografía y población, se trabaja con datos asociados al último censo de población publicado hasta la fecha (2005), series y proyecciones de población. Entre los diversos conjuntos de datos, se encuentran variables estadísticas como: población censada, tasa de

natalidad, tasa de fecundidad, esperanza de vida al nacer, viviendas ocupadas, hogares, etc.

### **Diseño de URI**

Con el objetivo de llevar a cabo la transformación de los datos del DANE a Linked Data, una de las principales decisiones, previas al proceso de transformación de las fuentes de información a RDF, es el formato o patrón en que los identificadores de las instancias (URI) van a ser generados. Las URI son extremadamente relevantes en este proceso, ya que contribuirán de manera clave en el alineamiento de instancias provenientes de diferentes fuentes de información. Por ello, en esta tarea se genera un patrón de URI para el conjunto de datos estudiados. La realización de esta tarea se da de conformidad con el principio de Linked Data señalado por Sauermann *et al.* (2008), que propone la utilización de URI para identificar recursos. Para el diseño del patrón de las URI que identifican los datos en el contexto de este trabajo, también se adoptaron las recomendaciones y buenas prácticas señaladas por Sauermann *et al.* (2008) y por Davidson (2009). A continuación se recogen los principales detalles del patrón:

**Raíz de las URI.** Se adopta como raíz de las URI

`<<http://geoportal.dane.gov.co/linkedstat/>>`.

A su vez, este será el dominio donde se publicará toda la información generada en el marco de este trabajo.

**Ontología (modelo).** El patrón adoptado para la identificación de un recurso (fenómeno geográfico) modelado en las diferentes ontologías utilizadas es el siguiente:



**Patrón:**

<http://geoportal.dane.gov.co/linkedstat/voc/{nombre ontología}/{concepto|propiedad}>

**Ejemplo:**

<http://geoportal.dane.gov.co/linkedstat/voc/DIVIPOLA#Departamento>

**Datos (instancias).** Para identificar los recursos asociados a los datos (instancias) se adopta el siguiente patrón:

**Patrón:**

<http://geoportal.dane.gov.co/linkedstat/recurso/{tipo de recurso}/{nombre de recurso}>

**Ejemplo:**

<http://geoportal.dane.gov.co/linkedstat/recurso/Departamento/25>

Así mismo, para identificar la geometría asociada a los diferentes recursos relacionados con la Divipola (centroides) se adopta el siguiente patrón:

**Patrón:**

[http://geoportal.dane.gov.co/linkedstat/recurso/lat\\_long](http://geoportal.dane.gov.co/linkedstat/recurso/lat_long)

**Ejemplo:**

[http://geoportal.dane.gov.co/linkedstat/recurso/-74,6695456055\\_4,37585313348](http://geoportal.dane.gov.co/linkedstat/recurso/-74,6695456055_4,37585313348)

Sobre este patrón de URI asociado a la información geométrica, merece ser destacado que los recursos se caracterizan por presentar la información geométrica conforme a GeoSPARQL serializada como Well-Known Text (WKT) o Geography Markup Language (GML). Asimismo, la geometría de estos recursos se representa en el sistema de referencia WGS84.

## Definición de la licencia

Según acuerdo, y previo estudio de las características de la puesta a disposición de la información al ciudadano por parte del DANE, la licencia que se utiliza en la publicación del Linked Data del DANE es del tipo Creative Commons en su acepción *by*, es decir, por reconocimiento. Esta licencia permite cualquier explotación de la obra, incluyendo una finalidad comercial, así como la creación de obras derivadas, la distribución de las cuales también está permitida sin ninguna restricción (Creative Commons, 2015).

## Modelado

Para modelar la información contenida en los conjuntos de datos se ha creado una red de ontologías, que es una colección de ontologías unidas a través de una variedad de diferentes relaciones. Esta red se ha desarrollado siguiendo la metodología de NeOn señalada por Suárez-Figueroa (2010), mediante la reutilización de ontologías y vocabularios existentes. Este trabajo está asociado con la actividad de *modelado* propuesta en la metodología mencionada. La figura 2 presenta el modelo de alto nivel de la red de ontologías DANE.



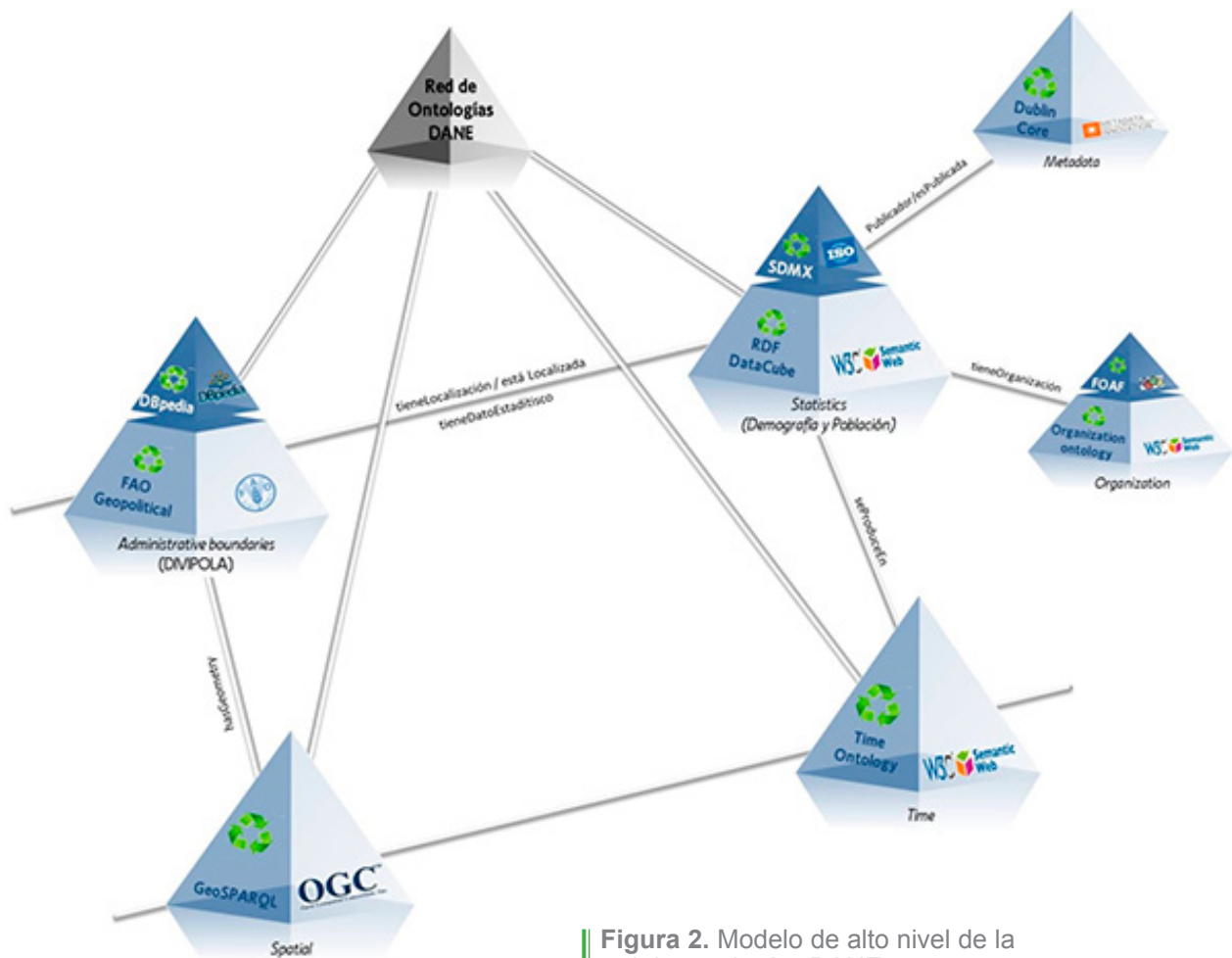


Figura 2. Modelo de alto nivel de la red de ontologías DANE  
Fuente: elaboración propia.

En esta figura se puede observar que la red de ontologías está compuesta por cuatro módulos diferentes que se corresponden con los principales temas identificados en el proyecto, es decir, división administrativa, estadística, (geo)espacial y tiempo.

El módulo asociado con la *división político-administrativa* del territorio (*administrative boundaries*) está compuesto por las siguientes ontologías:

- FAO geopolitical. Esta ontología ha sido desarrollada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y

la Alimentación (FAO) para facilitar el intercambio y distribución de datos de manera estandarizada entre sistemas de gestión de información sobre países o regiones; para el efecto incluye información en inglés acerca de continentes, regiones, países, etc.

- DBpedia recoge un esfuerzo de la comunidad por extraer información estructurada de Wikipedia y disponer de esta información en la web. Esta iniciativa pretende inspirar nuevos mecanismos para la navegación, la vinculación y la mejora de la propia enciclopedia.

Sobre la reutilización de estos recursos ontológicos, en este módulo se añade el conocimiento asociado a la división político-administrativa de Colombia, proveniente de los recursos no ontológicos asociados a la Divipola.

El módulo asociado con la *información estadística* y, más concretamente, con la información relacionada con el tema demografía y población, reutiliza los siguientes recursos:

- RDF Data Cube. Este vocabulario, propuesto como un estándar de W3C<sup>1</sup>, permite describir y publicar datos estadísticos multidimensionales haciendo uso del estándar Resource Description Framework (RDF) del W3C.

El modelo subyacente al vocabulario Data Cube es compatible con el modelo que subyace en Statistical Data and Metadata eXchange (SDMX). El vocabulario Data Cube es una base fundamental que apoya la extensión de vocabularios para permitir la publicación de otros aspectos de los flujos de datos estadísticos u otros conjuntos de datos multidimensionales.

- SDMX. La iniciativa SDMX fue creada para tratar con mayor eficiencia la práctica estadística. En la actualidad esta iniciativa es un estándar de la International Organization for Standar-

dization (ISO) para intercambiar y compartir datos y metadatos estadísticos entre organizaciones.

Sobre este estándar existe un vocabulario desarrollado para tratar los cubos de datos y apoyar la publicación de datos estadísticos en RDF utilizando un modelo de información basado en el estándar mencionado.

Junto a la reutilización de estos recursos ontológicos, en este módulo se añade el conocimiento asociado a la información estadística relacionada con el tema demografía y población, objeto de trabajo en este proyecto.

El módulo asociado con la *información espacial* se caracteriza por la reutilización de la propuesta proveniente del Open Geospatial Consortium (OGC). Este consorcio es el encargado de liderar los temas relacionados con la información geográfica y su interoperabilidad. En este sentido, se procede a reutilizar la ontología GeoSPARQL en su totalidad.

- GeoSPARQL. Es una especificación propuesta por el OGC, orientada a la representación y consulta de los datos espaciales en la web semántica. Esta propuesta define un vocabulario para la representación de información espacial en RDF/OWL.

<sup>1</sup>W3C (World Wide Web Consortium) es un consorcio internacional que genera recomendaciones y estándares que aseguran el crecimiento de la World Wide Web a largo plazo (tomado de <https://es.m.wikipedia.org>).





El módulo asociado con la *información temporal* se caracteriza por la reutilización de la propuesta proveniente del World Wide Web Consortium (W3C).

- W3C Time Ontology. Esta ontología de conceptos temporales desarrollada en el contexto del W3C proporciona un vocabulario para expresar hechos sobre las relaciones topológicas entre los instantes y los intervalos, junto con información sobre duración y fecha-hora.

Junto a los módulos anteriores, propiamente vinculados con los diferentes dominios de este proyecto, se añaden dos módulos adicionales a la red de ontologías del DANE que sirven para proporcionar descripciones adicionales sobre la información, que será objeto de su publicación conforme a los principios de Linked Data y sobre la organización que los proporciona, en este caso, el DANE.

Con respecto al módulo que recoge los elementos (*metadatos*) para la descripción de la información en la red de ontologías, este reutiliza la propuesta de Dublin Core.

- Dublin Core. Esta iniciativa recoge un modelo de metadatos elaborado y auspiciado por la Dublin Core Metadata Initiative (DCMI), una organización dedicada a fomentar la adopción extensa de los estándares interoperables de los metadatos y a promover el desarrollo de los vocabularios especializados de metadatos para describir recursos que permitan a los sistemas el descubrimiento de recursos.

El módulo que recoge los elementos para la *descripción de la organización*, en este

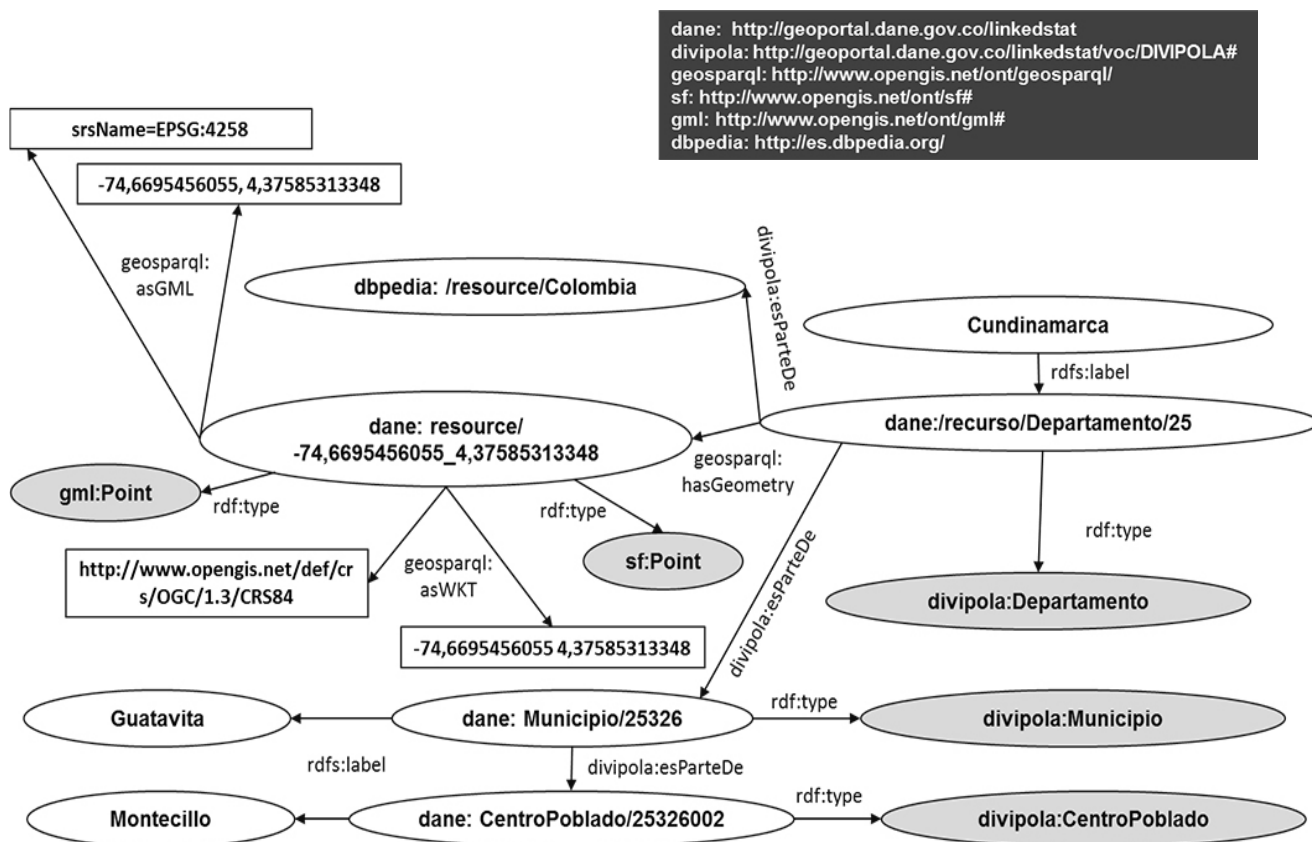
caso, el DANE, está compuesto por las siguientes ontologías:

- The organization ontology. Esta propuesta del W3C recoge una ontología fundamental para estructuras, destinadas a apoyar la publicación de Linked Data sobre la información de las organizaciones a través de diferentes dominios. Esta ontología está diseñada para permitir las extensiones específicas de dominio y posibilitar la adición de información relacionada con clasificación, actividades y roles organizacionales.
- FOAF vocabulary. Esta especificación describe el lenguaje Friend of a Friend (FOAF), definido como un diccionario de propiedades y clases nombradas utilizando la tecnología RDF del W3C.

## Generación de RDF

El objetivo de esta actividad es la generación de RDF de las fuentes de información asociadas a este proyecto para transformar los datos originales a un formato estándar e interoperable en el contexto de la web semántica. Además, este proceso permite transformar los datos del DANE en datos estructurados y en formato no propietario. Para ello, se ha utilizado Open Refine, una aplicación de escritorio de código abierto que admite la limpieza y transformación de datos a otros formatos, entre ellos RDF.

En la figura 3 se recoge una representación gráfica de los diferentes componentes del RDF generado de la Divipola conforme a GeoSPARQL y, por tanto, a la red de ontologías desarrollada en el contexto del proyecto.



**Figura 3.** Ejemplo de grafo RDF generado de Divipola  
Fuente: Elaboración propia.

Este trabajo va a permitir, por un lado, que el RDF generado en el contexto del proyecto sea conforme a los diferentes vocabularios y especificaciones para el tratamiento de la información estadística georreferenciada en el contexto de la web semántica. Además, dicho RDF es consistente con las buenas prácticas existentes en la comunidad geoespacial, al incluir en el RDF generado la geometría en formato WKT y GML.

### Generación de enlaces

El objetivo de esta actividad es la generación de relaciones (enlaces) entre los datos del DANE en formato RDF y

DBpedia (2015). Este trabajo se relaciona con la actividad de generación de links de la metodología utilizada y va a permitir que los datos del DANE aumenten su navegabilidad en la web de Linked Data, así como un enriquecimiento de los mismos mediante la incorporación de descripciones adicionales.

Para la generación de enlaces entre los datos del DANE y DBpedia se utilizan las funciones de reconciliación proporcionadas por Open Refine. Esto permite conectar los datos originales con los suministrados por DBpedia a través de su SPARQL Endpoint y, de esta manera, enriquecer los datos del DANE.



## Conclusiones y trabajo futuro

En este artículo se describen los principales detalles del proceso en curso para la generación y publicación de Linked Data de datos del DANE. Asimismo, en este trabajo se muestra cómo la información estadística georreferenciada puede aprovechar las ventajas y posibilidades de los más recientes y poderosos paradigmas de información mediante su interacción con la iniciativa Linked Data.

En definitiva, el trabajo realizado permite que los datos del DANE con los que se ha trabajado adquieran mayor expresividad y significado, gracias a la publicación de

los mismos conforme a los principios de Linked Data. Esto supone que el proyecto lleva los datos del DANE hacia una nueva dimensión, caracterizada por superar las barreras actuales en los procesos de publicación ortodoxa, logrando una integración e interoperabilidad semántica de los datos.

En cuanto al trabajo futuro, el proyecto se va a centrar en culminar las fases de publicación y explotación para poner a disposición y permitir al usuario acceder a estos datos de una manera accesible y amigable. En este sentido, los resultados actuales de estos avances se encuentran en el sitio web Geoportal del DANE.



## Bibliografía

---

- Creative Commons (2015). *Explicación de las licencias*. Recuperado de <http://es.creativecommons.org/license/>.
- Davidson, P. (2009) *Designing URI Sets for the UK Public Sector. A report from the Public Sector Information Domain of the CTO Council's cross-Government Enterprise Architecture UK Chief Technology Officer Council*. Recuperado de [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/60975/designing-URI-sets-uk-public-sector.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/60975/designing-URI-sets-uk-public-sector.pdf).
- DBpedia (2015). *About*. Recuperado de <http://wiki.dbpedia.org/about>.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2015). *Codificación de la División Político-administrativa de Colombia (Divipola)*. Disponible en <http://geoportal.dane.gov.co:8084/Divipola/>.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) (2016). *Geoportal DANE*. Disponible en: <https://geoportal.dane.gov.co/v2>.
- Sauermann, L., Cyganiak, R., Ayers, D. & Völkel, M. (2008). *Cool URIs for the Semantic Web*. W3C Interest Group Note 20080331. Recuperado de <https://www.w3.org/TR/2008/NOTE-cooluris-20080331/>.
- Suárez-Figueroa, M. C. (2010). *NeOn Methodology for Building Ontology Networks: Specification, Scheduling and Reuse* (PhD Thesis). Universidad Politécnica de Madrid, España.
- Vilches-Blázquez, L. M., Villazón-Terrazas, B., Corcho, O. & Gómez-Pérez, A. (2014). Integrating geographical information in the Linked Digital Earth. *International Journal of Digital Earth*, 7(7), 554-575. doi: <http://dx.doi.org/10.1080/17538947.2013.783127>.





# BIBLIOTECA IGAC

Toda la evidencia, los estudios, informes y los grandes aportes a la geografía, los suelos, el catastro y la ciencia geomática del país durante estos 82 años de existencia, la puede conocer a través de nuestra biblioteca

Más de  
19.959 libros



Visítanos: Más de 19.959 libros entre los que se destacan:  
El galardonado internacionalmente por la FAO: Suelos y Tierras de Colombia, Estudios General de Suelos y Zonificación de Tierras de los departamentos; Geografía y suelos para Niños., Geografía de Colombia, Estudio de los Conflictos de Uso del Territorio Colombiano, Manejo de Suelos Colombianos y Nariño: características geográficas, tesis de los programas de maestría del CIAF, Atlas de Colombia incluyendo la versión en Brayle.

**IGAC**  
INSTITUTO GEOGRÁFICO  
AGUSTÍN CODAZZI



**TODOS POR UN  
NUEVO PAÍS**  
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN

# Obtención de información multispectral georreferenciada de especies vegetales del Jardín Botánico de Bogotá mediante un sistema aéreo no tripulado

## *Multispectral georeferenced information acquisition of vegetable species from Bogotá Botanic Garden using an unmanned aerial system*

Jorge Luis Rodríguez<sup>1</sup>, Iván Lizarazo<sup>2</sup>

“Cómo citar este artículo: Rodríguez, J. L. y Lizarazo, I. (2017). Obtención de información multispectral georreferenciada de especies vegetales del Jardín Botánico de Bogotá mediante un sistema aéreo no tripulado. *Análisis Geográficos*, 52, 75-89.

### Resumen

En este trabajo se presenta la caracterización espectral de seis especies vegetales de interés para el arbolado urbano de Bogotá mediante un sistema aéreo no tripulado (UAS) de bajo costo. Para ello, se ensambló un hexacóptero FH-H800 dotado de controlador Pixhawk y capacidad para realizar vuelos autónomos. Se utilizaron dos cámaras estándar Canon A2300, una de ellas modificada manualmente para permitir la captura de datos en el rango infrarrojo cercano.

Se realizó la planeación de vuelos fotogramétricos a una altura de 120 m sobre el terreno con el objeto de cubrir el área del Jardín Botánico mediante dos vuelos de diez minutos cada uno. Se obtuvieron aproximadamente trescientas imágenes con tamaño de pixel de 0,10 m cubriendo los tres canales del espectro visible (B, G, R) y el canal infrarrojo cercano (NIR). Las imágenes se corrigieron mediante un proceso fotogramétrico basado en estructura a partir de movimiento (SfM) y estéreo correspondencia (MVS) usando software de código abierto, que permitió obtener un modelo digital de superficie (DSM) y elaborar ortofotomosaicos multispectrales (4 bandas) con exactitud de posición horizontal de 1,20 m para el 90 % de los datos. A partir de los ortofotomosaicos, se realizó la identificación y la caracterización de la respuesta espectral de las siguientes especies vegetales: magnolio (*Magnolia grandiflora*), carbonero (*Calliandra trinervia*), sietecueros (*Tibouchina lepidota*), roble (*Quercus humboldtii*), pino colombiano (*Podocarpus oleifolius*) y sangregao (*Croton funckianus*). Los resultados indicaron que la banda del infrarrojo cercano es esencial para realizar la diferenciación de estas especies vegetales. Este trabajo demuestra el potencial de los sistemas aéreos no tripulados para realizar caracterización y monitoreo de vegetación natural o cultivada de una manera económica y rápida.

**Palabras clave:** percepción remota, fotogrametría, UAS, UAV, multispectral.

<sup>1</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo: jorlrodriguezg@correo.udistrital.edu.co

<sup>2</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo: ilizarazo@udistrital.edu.co



## Abstract

*In this paper presents the spectral characterization of six plant species of interest to the urban trees of Bogotá by a low-cost unmanned aerial system (UAS). For this purpose a hexacopter FH-H800 equipped with PixHawk driver and autonomous flight capacity was assembled. Two standard cameras Canon A2300, one manually modified to allow data capture in the near infrared range was used. The photogrammetric flight planning was made for an altitude of 120 m above the ground in order to cover the area of the Botanical Garden by two flights of ten minutes each one. There were obtained approx. three hundred images with pixel size of 0.10 m covering the three channels of the visible spectrum (B, G, R) channel and the near infrared (NIR). The images were corrected by a photogrammetric process based on structure from motion (SFM) and stereo correspondence (MVS) using open source software that yielded a digital surface model (DSM) and develop multispectral orthofothomosaics (4 bands) with accurately horizontal position of 1.20 m for 90 % of the data. From the orthomosaics, identification and characterization of the spectral response of the following plant species was conducted: magnolia (*Magnolia grandiflora*), carbonero (*Calliandra trinervia*), sietecueros (*Tibouchina lepidota*), roble (*Quercus humboldtii*), pino colombiano (*Podocarpus oleifolius*) y sangregao (*Croton funckianus*). The results indicated that the near-infrared band is essential for the differentiation of these plant species. This work demonstrates the potential of UAS for fast and economical characterization and monitoring of natural or cultivated vegetation.*

**Keywords:** Remote Sensing, Photogrammetry, UAS, UAV, Multispectral.

## Introducción

**C**olombia es uno de los países con mayor diversidad biológica del mundo, con cerca de 40 000 especies de plantas vasculares registradas (Samper, Gómez Mejía & Wyse-Jackson, 2002). Esta gran diversidad significa también que debe hacerse un gran esfuerzo para su conservación, tarea que el Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis realiza mediante sus programas de investigación y conservación. Por ello, el objetivo del trabajo fue georreferenciar y realizar la caracterización espectral de seis especies vegetales de interés del Jardín Botánico José Celestino Mutis de Bogotá mediante la utilización de un sistema de percepción remota no tripulado.

En la actualidad, hay gran interés en el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV, por la sigla en inglés de *Unmanned Aerial Vehicle*) en diversas actividades, entre ellas, la adquisición de información en percepción remota, debido a la capacidad de obtener información de una muy alta resolución espacial (Turner, Lucieer & Watson, 2012) y temporal (Laliberte *et al.*, 2011), dado su fácil despliegue y el bajo costo de operación.

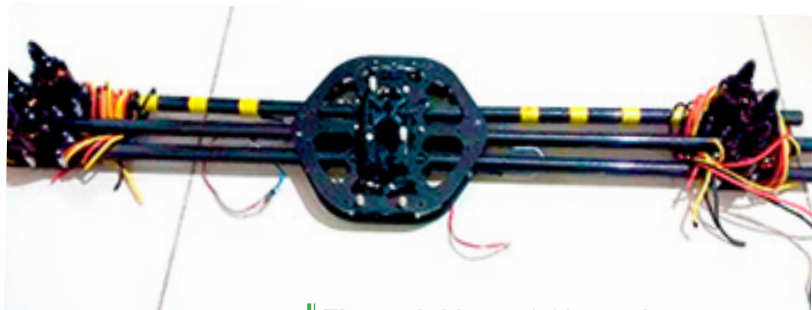
El uso de los UAV permite la obtención de información espacial en periodos cortos de tiempo a bajos costos, por lo cual son ideales para trabajos que requieran de actualización continua (D'Oleire-Oltmanns *et al.*, 2012).

El uso de información en el rango visible e infrarrojo para seguimiento de vegetación es teóricamente superior que disponer

solamente del rango visible, debido al gran contraste entre la reflexión de la vegetación en el rango infrarrojo y en el rango visible, la alta correlación de las tres bandas del visible y las posibilidades de usar índices espectrales, como el de vegetación de diferencia normalizada o NDVI, por la sigla en inglés de *normalized difference vegetation index* (Nijland *et al.*, 2014).

## Materiales y métodos

Para el desarrollo de la plataforma aérea del sistema de percepción remota se propuso la utilización de un UAV de despegue y aterrizaje vertical, ya que este tipo de vehículos permiten mejor control y mayor maniobrabilidad en entornos de difícil acceso. El tipo de vehículo seleccionado fue un hexacóptero (figura 1), debido a su estabilidad y capacidad de carga.



**Figura 1.** Marco del hexacóptero

Fuente: propia del proyecto.

Para el control asistido del UAV se eligió el controlador Pixhawk (figura 2) producido por 3D Robotics, diseñado para su uso en multirrotores, aviones, helicópteros y carros. En el caso de los multirrotores, soporta varios tipos de marcos, entre ellos, tricópteros, cuadricópteros, hexacópteros y octocópteros. El piloto automático se compone de un controlador principal que tiene un sistema IMU y brújula integrada, un módulo de poder que soporta baterías





LiPo desde dos celdas (2s) hasta cuatro celdas (4s), un receptor GPS y brújula, que tiene también IMU, y un led que brinda información visual del estado del UAV.



Figura 2. Controlador Pixhawk  
Fuente: propia del proyecto.

Con el controlador Pixhawk es posible tener acceso a los datos de posicionamiento satelital e IMU, ya que el sistema guarda automáticamente todos los datos del estado del equipo durante cada vuelo. Igualmente, estos datos son transmitidos a la estación de tierra, donde pueden ser monitorizados en tiempo real.

Para la adquisición de imágenes multiespectrales se utilizaron dos cámaras Canon A2300. A una de ellas se le eliminó el filtro RGB (figura 3), que bloquea el paso de información fuera del espectro visible, con el fin de permitir el ingreso de información en el rango del infrarrojo.

El proyecto fue desarrollado en el Jardín Botánico José Celestino Mutis de Bogotá (figura 4). Se realizó la planeación de vuelos fotogramétricos de modo que se pudiera cubrir el área del Jardín Botánico

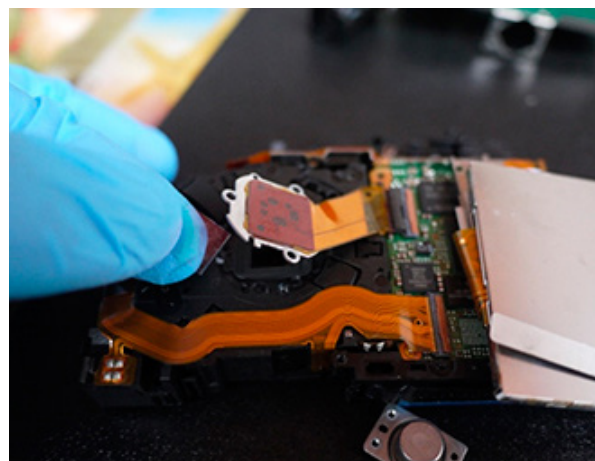


Figura 3. Remoción del filtro RGB  
Fuente: propia del proyecto.

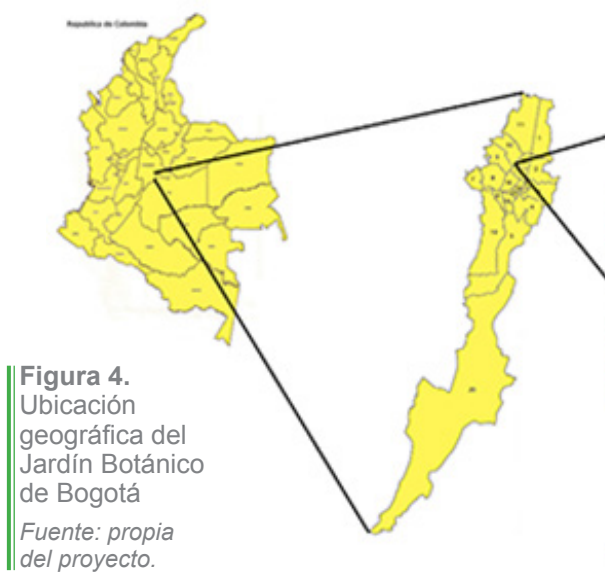
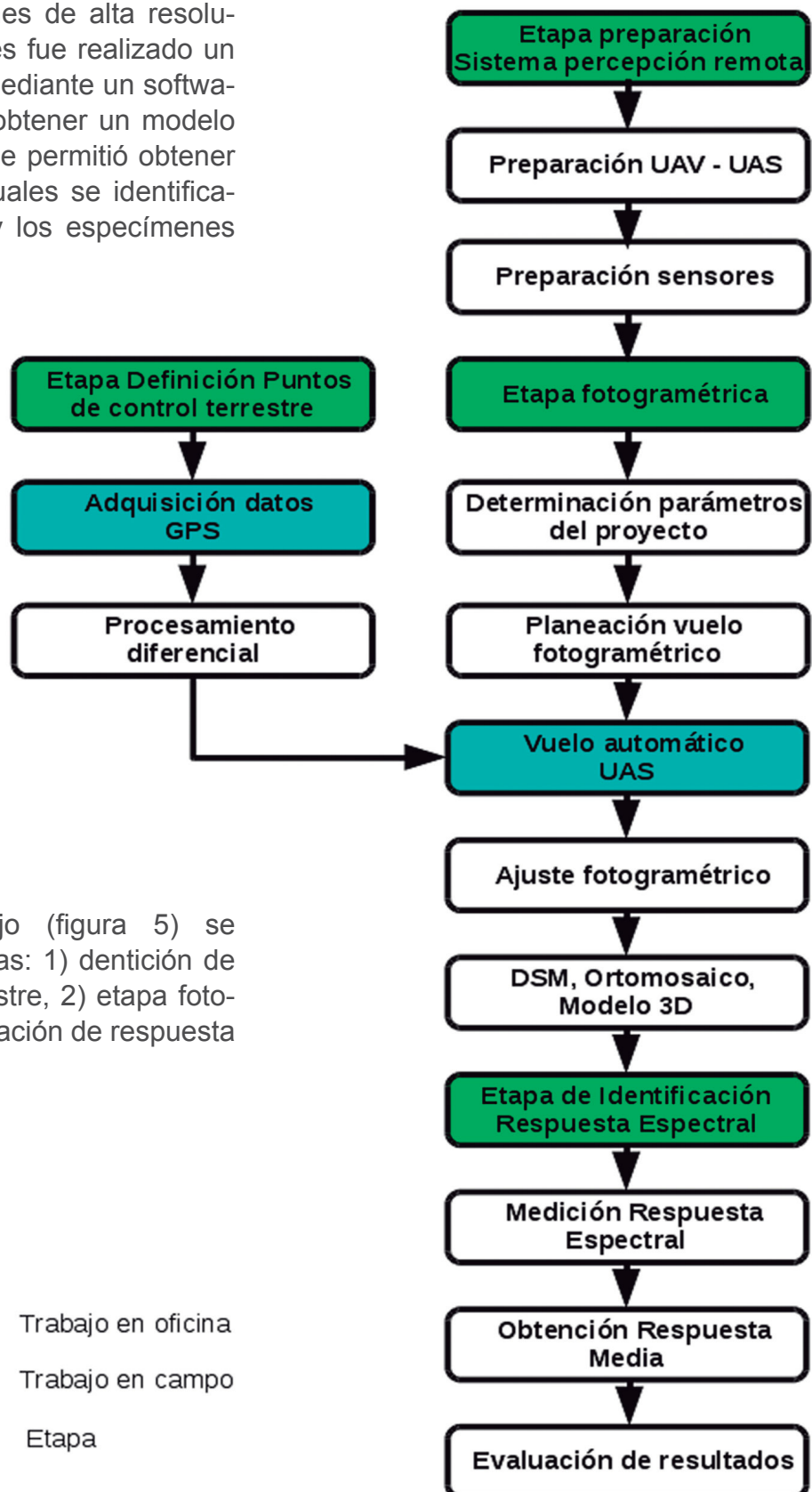


Figura 4.  
Ubicación  
geográfica del  
Jardín Botánico  
de Bogotá  
Fuente: propia  
del proyecto.

con suficientes imágenes de alta resolución. A las imágenes les fue realizado un ajuste fotogramétrico mediante un software especializado para obtener un modelo digital de superficie, que permitió obtener ortomosaicos en los cuales se identificaron las comunidades y los especímenes vegetales.



El método de trabajo (figura 5) se desarrolló en tres etapas: 1) definición de puntos de control terrestre, 2) etapa fotogramétrica y 3) identificación de respuesta espectral.

**Figura 5.** Metodología del proyecto  
Fuente: elaboración de los autores.



Los puntos de control terrestre fueron utilizados para realizar el ajuste fotogramétrico de las imágenes obtenidas en el proceso de captura. Estos puntos de control se ubicaron en el Jardín Botánico teniendo en cuenta dos condiciones, la primera, que estuvieran ampliamente distribuidos dentro del área de estudio, y la segunda, que fueran visibles para los sensores a bordo del UAV. La figura 6 muestra el esquema de ubicación de los 10 puntos de control utilizados.



**Figura 6.** Ubicación de puntos de control terrestre  
*Fuente: propia del proyecto.*

Para el posicionamiento de estos puntos de control terrestre se empleó un método de levantamiento estático rápido, utilizando la estación BOGA como base y dos

receptores Leica como móviles. En cada punto de control se efectuó un rastreo de aproximadamente 45 minutos. Realizado el postprocesamiento se obtuvieron los puntos de control mostrados en la tabla 1.

La etapa fotogramétrica incluyó, en primer lugar, la planeación del vuelo, en la cual se determinó la altura necesaria para alcanzar la resolución requerida y el número de líneas para cubrir adecuadamente el área de estudio. Para esta etapa fueron tenidos en cuenta los criterios propuestos por Eisenbeiß (2009). El software Mission Planner de la estación de tierra del sistema aéreo no tripulado (UAS) permite agilizar la planeación de los vuelos, ya que incluye un módulo llamado “Flight Plan” que permite la generación automática de las líneas de vuelo.

En la figura 7 se observan los dos planes diseñados para cubrir el jardín botánico, cada uno de los cuales tuvo una duración aproximada de diez minutos, y en ambos casos se realizó un despegue controlado de forma manual para, posteriormente, entrar en modo de navegación autónoma, en el cual el aparato recorrió las rutas previamente definidas. Estos vuelos fueron supervisados mediante el software de la estación de tierra.

**Tabla 1.** Puntos de control terrestre

Label	Latitud	Longitud	Altitud
ENTRADA	4,6679905472	-74,0981616722	2573,1162
KIOSKO	4,666460875	-74,099294925	2572,9437
MIRADOR	4,6667016167	-74,10003495	2582,2291
CONST_NUEVA	4,6670977944	-74,1009004556	2573,4013
KACTUS_Z_SECA	4,6685024944	-74,102489575	2573,4829
HERBARIO	4,6691941111	-74,1017116667	2572,9842
MONUMENTO	4,668058425	-74,1009646639	2573,0731
CORREDOR	4,6687896528	-74,0990920583	2572,8534
TROPICARIO	4,668068775	-74,0998699028	2573,6226
ENTRADA N O	4.66987	-74.100695	2573.6226

*Fuente: propia del proyecto.*





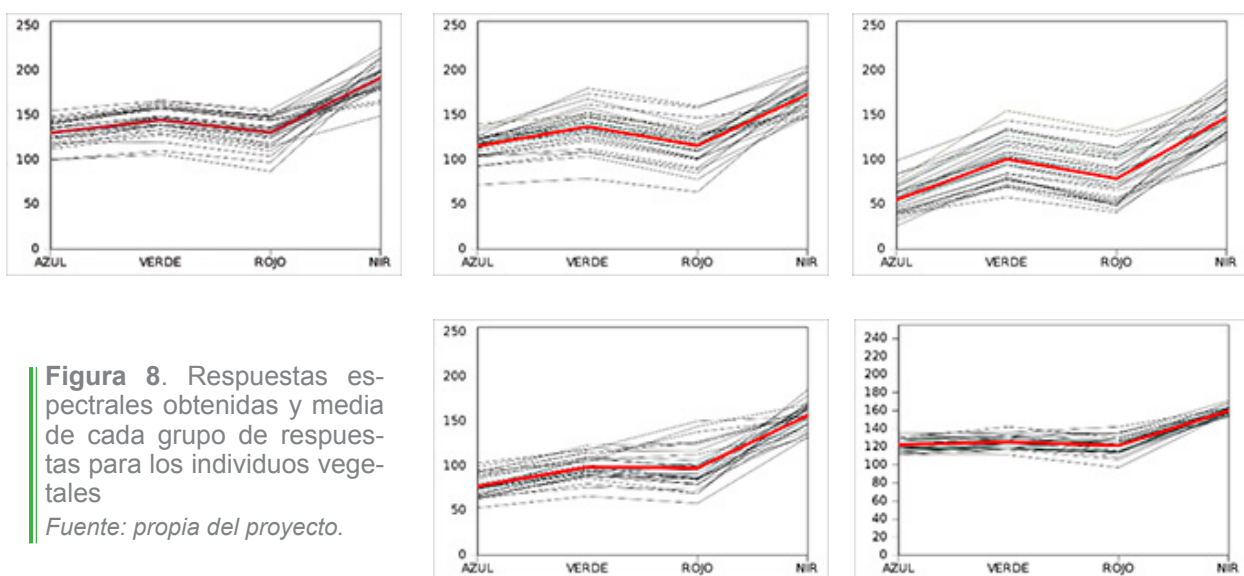
**Figura 7.** Planes de vuelo

*Fuente: elaboración propia a partir de imágenes de Google Maps, 2015.*

El ajuste fotogramétrico se realizó mediante el software Agisoft PhotoScan, ya que permite al usuario familiarizarse con las funciones que brinda y realizar el ajuste de los bloques de imágenes.

Para la identificación de las respuestas espectrales (figura 8), una vez hecho el ajuste fotogramétrico de los dos bloques de imágenes, se realizó la separación en

6 bandas, 3 para el mosaico RGB y 3 para el mosaico en infrarrojo. Después de obtener estas bandas se realizó una composición mediante el software GRASS GIS utilizando la banda roja de la cámara infrarroja, la cual contiene la mayoría de la información del infrarrojo y las bandas roja, verde y azul de la cámara RGB. Para cada individuo se identificaron 30 respuestas espectrales, para las cuales se halló la media.



**Figura 8.** Respuestas espectrales obtenidas y media de cada grupo de respuestas para los individuos vegetales

*Fuente: propia del proyecto.*





## Resultados y discusión

Se obtuvo un sistema aéreo no tripulado de percepción remota, con capacidad de navegación autónoma, semiautónoma y manual, del cual se pudieron obtener los datos GPS-INS para la geolocalización y la orientación automática de las imágenes adquiridas durante los vuelos realizados sobre el Jardín Botánico de Bogotá. El sistema está equipado con dos cámaras: una estándar, que captura información en el rango visible, y una capaz de adquirir información en el rango del infrarrojo.

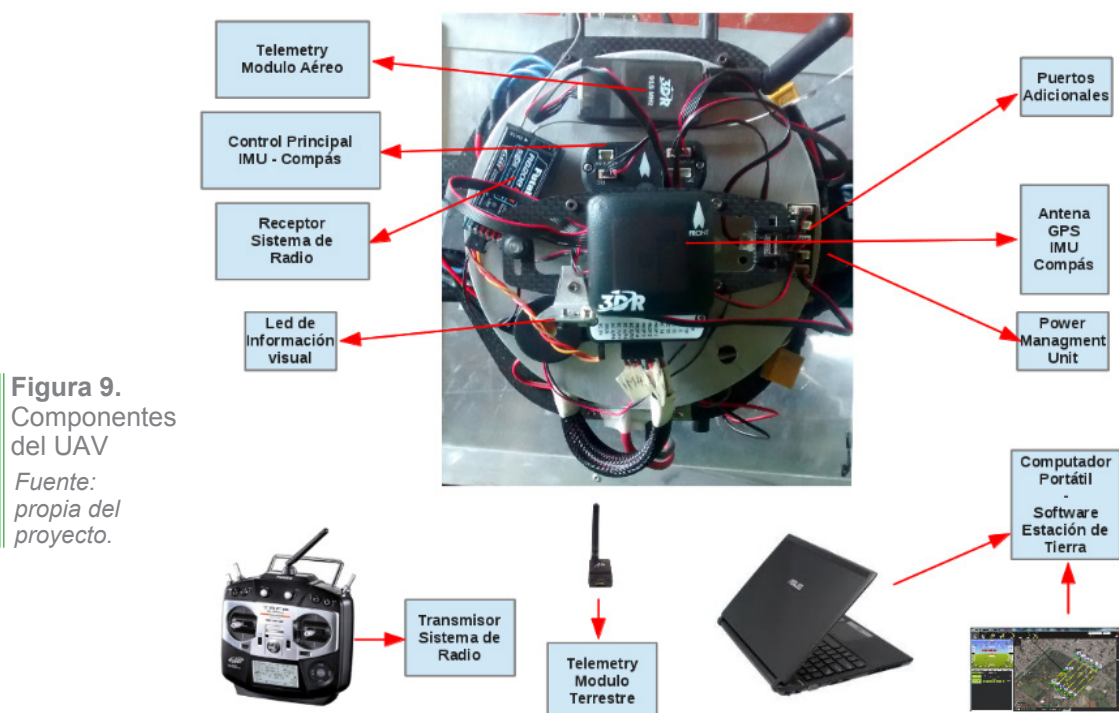
El sistema está conformado por dos segmentos: el segmento aéreo está integrado por el vehículo, sus sistemas de navegación, comunicaciones y los sensores llevados a bordo, y el segmento terrestre, compuesto por un equipo de cómputo, en el cual se tiene el software de control del UAV, un sistema de comunicación que brinda telemetría en tiempo real y un sistema de radio que permite el control manual

del aparato en caso de ser necesario (figura 9).

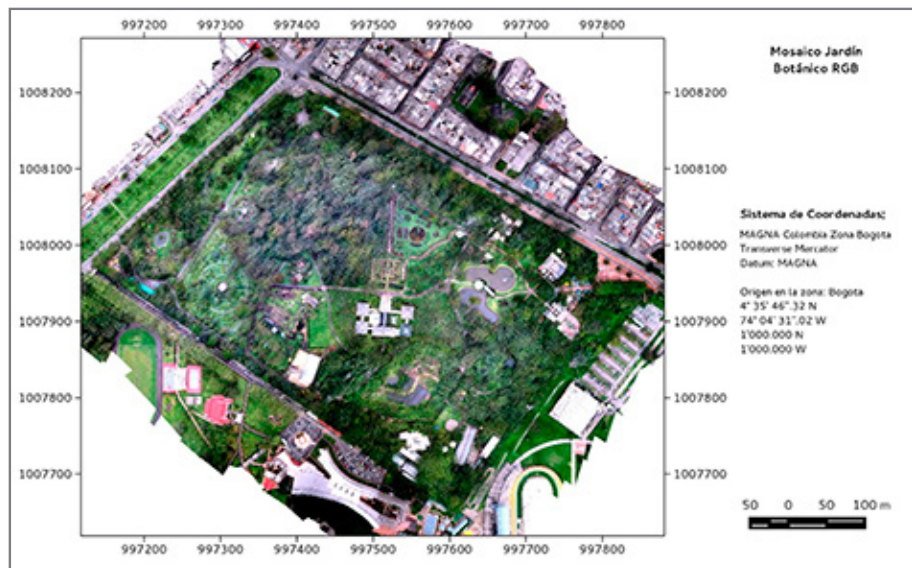
En el UAV, las cámaras se encuentran orientadas en la misma dirección (figura 10), sobre una plataforma que no es giroestabilizada para conservar la alineación con los sensores inerciales del vehículo.



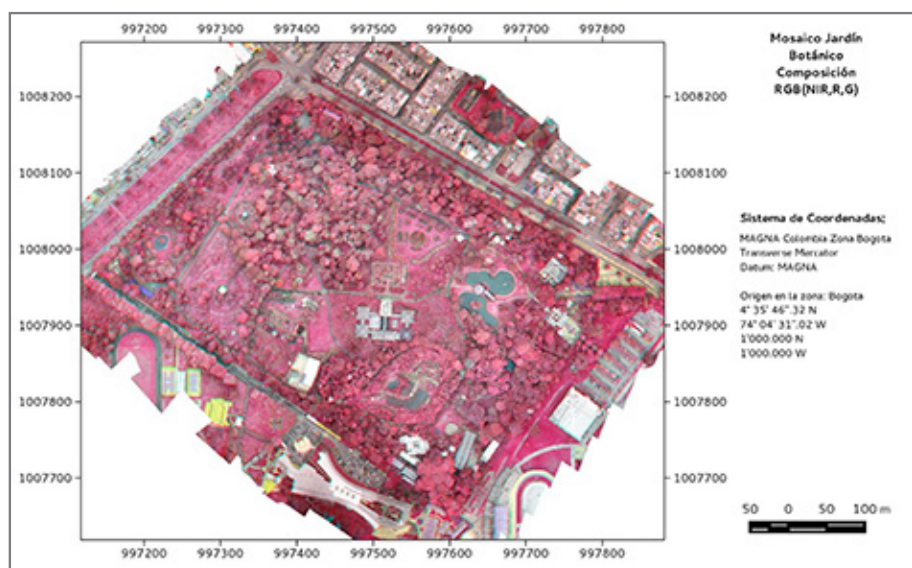
**Figura 10.** Soporte para las cámaras  
Fuente: propia del proyecto.



**Figura 9.** Componentes del UAV  
Fuente: propia del proyecto.



**Figura 11.** Mosaico Jardín Botánico, composición RGB (R, G, B)  
Fuente: propia del proyecto.



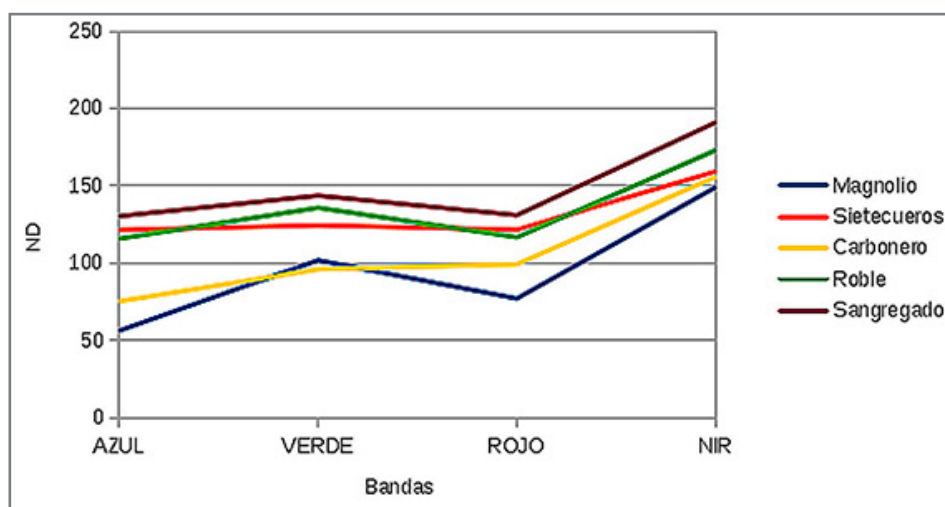
**Figura 12.** Mosaico Jardín Botánico, composición RGB (NIR, R, G)  
Fuente: propia del proyecto.

Con la realización de los vuelos fotogramétricos con el UAV se obtuvieron 173 imágenes en color natural para el primer vuelo y 153 para el segundo. En infrarrojo, se adquirieron 142 imágenes para el primer vuelo y 141 para el segundo.

Mediante el ajuste fotogramétrico de los bloques de imágenes se obtuvieron cuatro bandas espectrales: azul, verde, rojo e infrarrojo cercano, a partir de las cuales se generaron composiciones en verdadero color (figura 11) y en falso color (figura 12).

A partir de los ortofotomosaicos, se realizó la identificación y la caracterización de la respuesta espectral de las siguientes especies vegetales: magnolio, carbonero, sietecueros, roble, pino colombiano y sangregao. Estas respuestas, expresadas en términos de niveles digitales, se muestran en la figura 13.

En la figura 14 se muestran las rutas recorridas por el UAV en los dos vuelos realizados. Estas rutas fueron recreadas utilizando los datos de navegación del equipo, y muestran que el plan de vuelo fue seguido por el vehículo de acuerdo con los planes de vuelo generados.



**Figura 13.** Respuestas espectrales para las cinco especies vegetales  
Fuente: propia del proyecto.

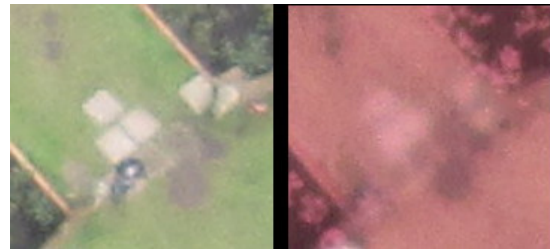


**Figura 14.** Rutas recorridas por el UAV  
Fuente: elaboración propia a partir de imágenes de Google Earth, 2015.



Algunas de las imágenes capturadas durante el vuelo quedaron borrosas, razón por la cual fueron eliminadas del proceso de ajuste fotogramétrico para evitar la introducción de errores en la alineación de los bloques de imágenes. Este problema se presentó con mayor frecuencia en las imágenes obtenidas con la cámara modificada para capturar infrarrojo. Adicionalmente, se observó que la modificación de la cámara degrada la calidad de la imagen, como se ve en la figura 15, donde se muestran dos imágenes de la misma zona: en la imagen en RGB se pueden diferenciar claramente las baldosas de concreto y los bordes de los jardines, mientras que en la imagen en infrarrojo estos objetos se confunden con el pasto que se encuentra en la zona.

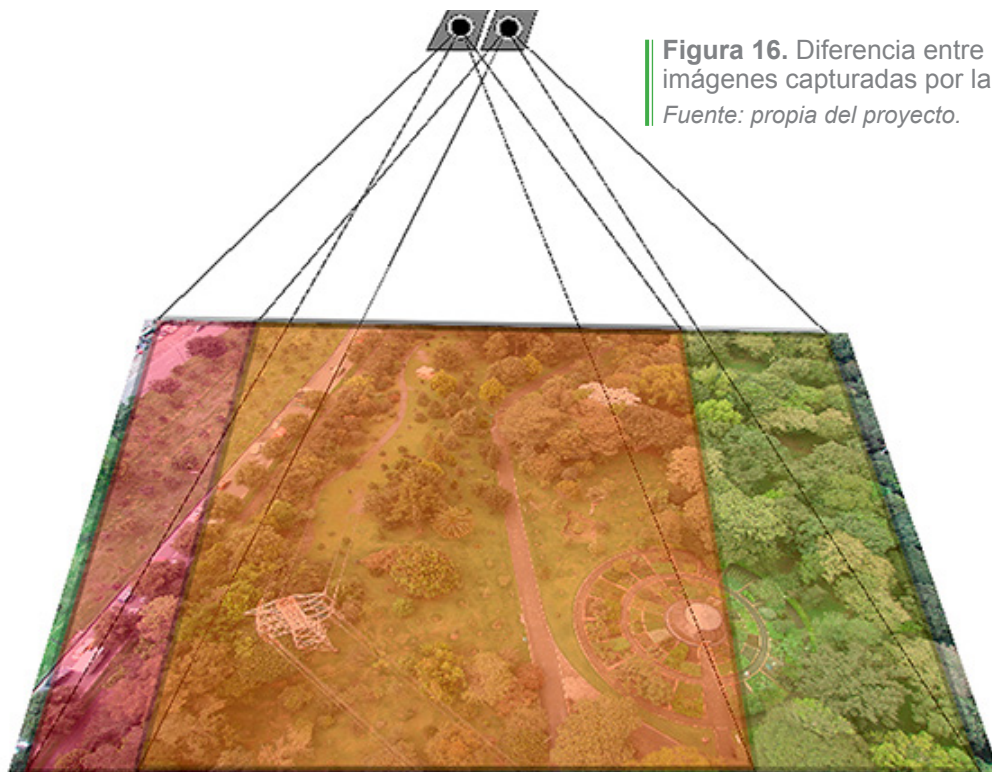
La utilización de dos cámaras diferentes para adquirir imágenes en el rango visible e infrarrojo genera diferencias en las áreas



**Figura 15.** Comparación imágenes capturadas con la cámara sin modificar y con la cámara modificada

*Fuente: propia del proyecto.*

que captura cada cámara, como se muestra en la figura 16. Esto puede ser ocasionado por varios factores: de una parte, debido a la distorsión del lente, propia de cada cámara, y, de otra, debido a que los sensores de estas se encuentran separados por aproximadamente 5 cm; además, por la diferencia en el tiempo de obturación de cada cámara.



**Figura 16.** Diferencia entre la cobertura de las imágenes capturadas por las cámaras

*Fuente: propia del proyecto.*



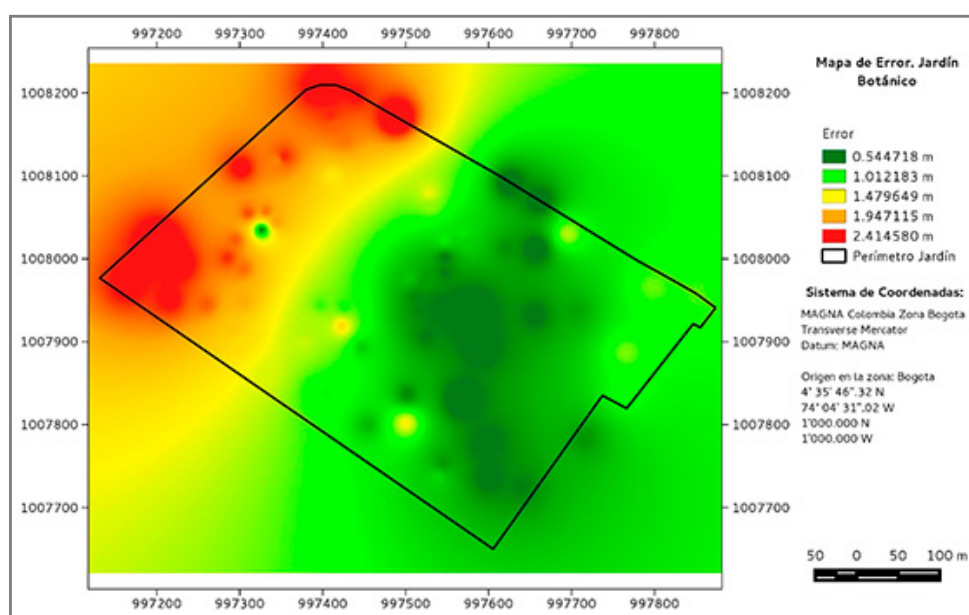


Esta diferencia en la cobertura de las imágenes dificulta el análisis de la respuesta espectral de las especies estudiadas directamente y agrega tiempo de trabajo al proceso de identificación de las respuestas espectrales.

El Jardín Botánico de Bogotá suministró un corte de la ortofoto digital de Bogotá de 2014 distribuida por la Unidad Administrativa Especial de Catastro Distrital. Con esta ortofoto se hizo la validación de la exactitud en posición del ortomosaico obtenido de las imágenes capturadas por las cámaras a bordo del UAV. Se determinaron 80 puntos de muestreo que fueran fácilmente identificables en la ortofoto digital y en el mosaico obtenido del vuelo del UAV. La validación de la exactitud se centró en encontrar la distancia entre las coordenadas observadas en la ortofoto digital y el mosaico obtenido en el proyecto, lo cual arrojó una media de 1.265 m.

En la figura 17 se muestra la distribución espacial del error encontrado en el mosaico obtenido del UAV respecto a la ortofoto digital de Bogotá. En esta imagen se observa que el error es mayor hacia la parte occidental y se acentúa en las dos esquinas del mosaico. Un posible factor en este resultado puede ser la calidad de la información recolectada por los GPS en los puntos de control; en este sentido, los puntos ubicados en esta zona del Jardín Botánico se encontraban rodeados por árboles altos que posiblemente afectaron la calidad de la señal que llegaba a los receptores GPS.

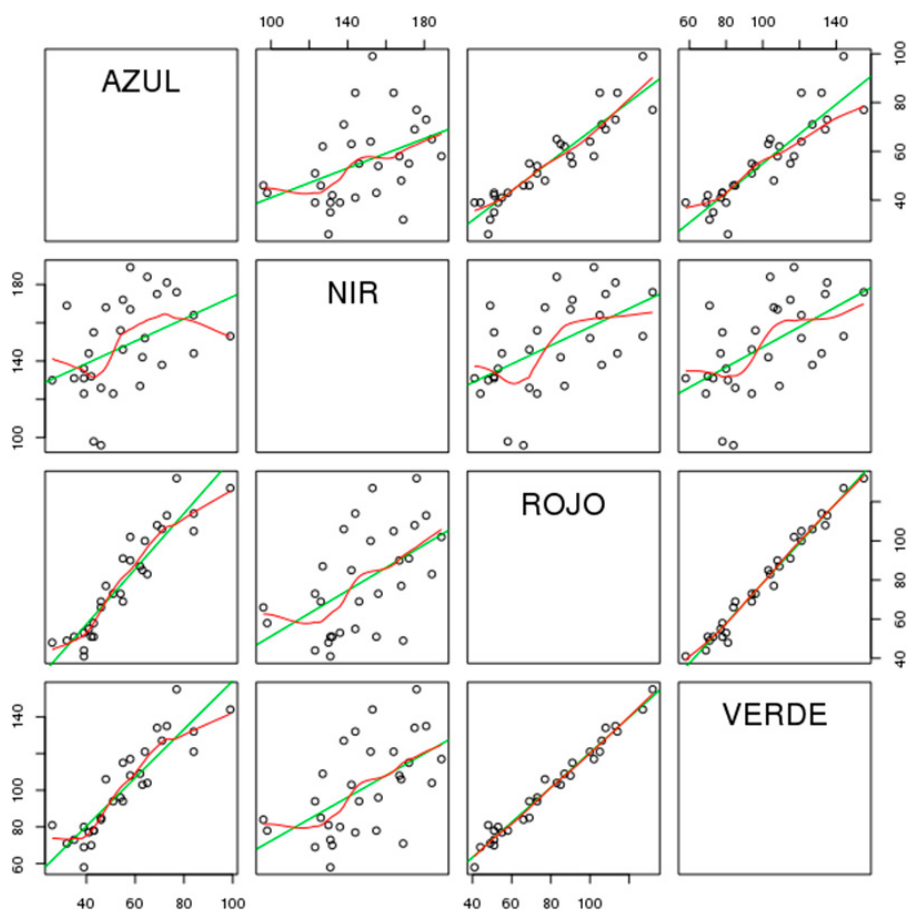
Esta validación brinda un marco de comparación de la exactitud posicional del mosaico obtenido; sin embargo, el error encontrado puede ser menor o mayor si se compara con otro tipo de información espacial, como un levantamiento topográfico, ya que según el reporte de calidad de la ortofoto digital de Bogotá, esta tiene una exactitud de 0,54 metros en XY.



**Figura 17.** Mapa de error del Jardín Botánico  
*Fuente: propia del proyecto.*

Las respuestas espectrales obtenidas durante el desarrollo del proyecto se han trabajado en términos de niveles digitales, sin embargo, se aprecia que dichas respuestas tienen un comportamiento similar al esperado con el uso de otro tipo de sensores: la vegetación en las bandas del visible tienen respuestas bajas, similares entre sí, con una mayor respuesta en la banda verde. En la banda del infrarrojo obtenida con la modificación de la cámara se observa una respuesta más alta que en las demás bandas, y esto concuerda con lo esperado al utilizar, por ejemplo, el radiotelespectrómetro.

En la figura 18 se observa una matriz de diagramas de dispersión entre las bandas espectrales obtenidas para el caso de la especie conocida con el nombre de carbonero. En esta matriz se evidencia que la banda del infrarrojo obtenida con la modificación de la cámara tiene una alta dispersión con respecto a las bandas del azul, el verde y el rojo, lo cual indica que no existe una dependencia lineal con estas bandas. Esto permite inferir que esta banda está brindando información diferente a la que se encuentra en las otras, cuya adquisición es posible solo por esta modificación.



**Figura 18.** Matriz de diagramas de dispersión para el carbonero

*Fuente: propia del proyecto.*



## Conclusiones

Se logró el ensamble de un sistema aéreo de percepción remota de bajo costo que permitió la realización de vuelos fotogramétricos autónomos, durante los cuales pudieron obtenerse simultáneamente imágenes en el rango visible y en el rango infrarrojo del espectro electromagnético mediante el uso de dos cámaras de bajo costo, una de ellas modificada para permitir el ingreso de información en el rango infrarrojo. La mayor ventaja del sistema fue que las imágenes adquiridas pudieron ser geoetiquetadas directamente en el software de la estación de tierra. Así mismo, los datos GPS-INS fueron exportados automáticamente a diferentes formatos de texto, como csv y txt, lo que permitió la orientación directa del sensor respecto a la tierra en el momento de la toma de las imágenes.

El uso de cámaras compactas que no han sido diseñadas para fotogrametría o percepción remota genera dificultades en el ajuste fotogramétrico, principalmente en las imágenes adquiridas con la cámara

modificada, ya que remover el filtro degrada la calidad de las imágenes que se adquieren.

Se realizó el ajuste fotogramétrico de 326 imágenes RGB y 283 imágenes en infrarrojo, correspondientes a los dos vuelos realizados sobre el Jardín Botánico de Bogotá, el cual permitió la generación de un modelo digital de superficie para la creación de dos ortomosaicos, uno en color RGB y otro en infrarrojo falso color.

Se realizó la identificación de la respuesta espectral de las especies vegetales: magnolio (*Magnolia grandiflora*), carbonero (*Calliandra trinervia*), sietecuecos (*Tibouchina lepidota*), roble (*Quercus humboldtii*) y sangregao (*Croton funkianus*). Esta identificación se realizó en términos de niveles digitales, lo que dificulta su comparación con otras fuentes de información. Sin embargo, es una aproximación que indica que la modificación de la cámara permite efectivamente obtener información nueva que puede ser de utilidad en diferentes procesos.



## Bibliografía

- D'Oleire-Oltmanns, S., Marzloff, I., Peter, K. & Ries, J. (2012, 9). Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. *Remote Sensing*, 4(12), 3390-3416. doi:10.3390/rs4113390.
- Eisenbeiß, H. (2009). *UAV Photogrammetry* (tesis de doctorado). University of Technology, Dresden, Alemania. Recuperado de [http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/blaue\\_Berichte\\_PDF/105.pdf](http://www.igp-data.ethz.ch/berichte/blaue_Berichte_PDF/105.pdf).
- Laliberte, A. S., Goforth, M. A., Steele, C. M. & Rango, A. (2011). Multispectral Remote Sensing from Unmanned Aircraft: Image Processing Workflows and Applications for Rangeland Environments. *Remote Sensing*, 3(11), 2529-2551. doi:10.3390/rs3112529.
- Nijland, W., De Jong, R., De Jong, S., Wulder, M., Bater, C. & Coops, N. (2014). Monitoring plant condition and phenology using infrared sensitive consumer grade digital cameras. *Agricultural and Forest Meteorology*, 184, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.09.007>.
- Samper, C., Gómez Mejía, A. & Wyse-Jackson, P. (Feb. 2002). Plant Conservation and Information Management in Botanic Gardens of Colombia. *Online archive of BGCI News*, 3(8). Retrieved from <http://www.bgci.org/resources/article/0366/>.
- Turner, D., Lucieer, A. & Watson, C. (2012). An Automated Technique for Generating Georectified Mosaics from Ultra-High Resolution Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Imagery, Based on Structure from Motion (SfM) Point Clouds. *Remote Sensing*, 4(12), 1392-1410. doi:10.3390/rs4051392.







# LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI

## LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS

En la sede central del **IGAC**, ubicada en Bogotá, existe un lugar donde los usuarios llevan las muestras de suelo, compost, tejido vegetal y agua para diagnóstico.

Se trata del **Laboratorio Nacional de Suelos**, un lugar en donde se realizan análisis físicos e ingenieriles, químicos, biológicos, mineralógicos y micromorfológicos de suelos, calidad de agua para riego, fitopatología, análisis de abonos y compost, recomendaciones técnicas para cultivos (enmiendas y fertilización) e investigación aplicada con base en estas temáticas.

## RESULTADOS OFRECIDOS

En razón de su experiencia analítica, el Laboratorio Nacional de Suelos ofrece una amplia gama de análisis con estándares de calidad. Cuando el cliente lo solicita se realiza una interpretación y/o recomendación general.

## ANÁLISIS FÍSICOS E INGENIERILES

Las **propiedades físicas** involucran cada una de las fases de formación del suelo y desarrollo del perfil y permiten evaluar aspectos edáficos, taxonomía, fertilidad, riego, drenaje, manejo y conservación.

En el campo ingenieril, los análisis permiten conocer la aptitud de los materiales para su utilización y aprestamiento.

## ANÁLISIS QUÍMICO

Determina y cuantifica los nutrientes del suelo. Estos análisis se realizan para **establecer el estado nutricional del suelo y determinar su calidad agrícola**. Con esta información se toman decisiones para el mejoramiento de los suelos y cultivos mediante el uso de enmiendas de fertilizantes o de abonos orgánicos.

## ANÁLISIS BIOLÓGICO

La evaluación de las poblaciones biológicas permite **reconocer el estado nutricional y de salubridad de un suelo**. Las bacterias, hongos, algas y fauna del suelo son considerados los principales responsables de la degradación de la materia orgánica y de la liberación de los nutrientes, lo que condiciona la fertilidad y capacidad de sustento de las plantas.

## ANÁLISIS DE AGUA PARA RIEGO

Consta de dos análisis, **químico** y **biológico**. El primero cuantifica la concentración y composición de los iones que determinan la calidad del agua para riego, mientras que el segundo detecta indicadores de riesgo sanitario, lo que alerta sobre su aplicabilidad en el campo agrícola y pecuario.

## ANÁLISIS MINERALÓGICO Y MICROMORFOLÓGICO

El análisis mineralógico evalúa las fracciones de arena y arcilla lo que permite apoyar el reconocimiento de la génesis, la taxonomía y la fertilidad potencial de un suelo.

Por su parte, con la caracterización micromorfológica se reconoce la microestructura del suelo, siendo de gran utilidad en la clasificación taxonómica.

## ANÁLISIS DE TEJIDO VEGETAL

Permite **evaluar el ambiente nutricional suelo-planta**, al confirmar el requerimiento de un nutriente particular especificando un tratamiento correctivo.

Con un análisis químico, se determinan los elementos nutritivos presentes en diferentes partes de la planta y de esta forma se pueden implementar planes de fertilización y mantenimiento de cultivos. También se evalúa la posible existencia de patógenos que atacan las plantas (hongos, bacterias y nemátodos) y según requerimiento se procede con su identificación.

# Identificación de los efectos del estrés hídrico en cultivos de algodón por medio de sensores remotos

## *Identification of water stress effects on cotton crops using remote sensing*

Fabio H. Echeverry Andrade<sup>1</sup>

“Cómo citar este artículo: Echeverry Andrade, F. H. (2017). Identificación de los efectos del estrés hídrico en cultivos de algodón por medio de sensores remotos. *Análisis Geográficos*, 52, 91-106.

### Resumen

La demanda promedio de algodón en Colombia desde el 2006 ha caído de 80 000 toneladas por año a 30 000 debido a los fuertes cambios climáticos, lo cual se refleja en la mala calidad de la fibra de hilatura. En este trabajo se identificaron los efectos del estrés hídrico del cultivo de algodón en el municipio de Villavieja, Huila. Para ello se emplearon 12 imágenes satelitales de las series Landsat 4 TM, 5 TM y 7 ETM+ correspondientes a diferentes periodos climáticos de Colombia (secos y húmedos). Las imágenes fueron procesadas en el software Erdas Imagine 9.2 y se les aplicaron diferentes transformaciones: radiancia, reflectancia, índice de vegetación por diferencia normalizada e índice diferencial de agua normalizado, para finalmente calcular el índice diferencial de sequía normalizado. También se aplicó el índice empírico de humedad de referencia del estrés hídrico (CWSI) con datos de temperatura superficial. La validación dio como resultado una correlación de  $R^2 = 0,9271$  y  $0,4757$  para la temporada seca y la húmeda, respectivamente. Cuando se determina el valor umbral en las diferentes etapas fenológicas del cultivo, el índice CWSI ha demostrado ser de especial utilidad para programar el riego durante y evitar de esa manera daños por estrés hídrico y disminución en la producción.

**Palabras clave:** índice CWSI, estrés hídrico, percepción remota, termometría infrarroja, cultivos de algodón.

<sup>1</sup> Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, Programa de Ingeniería Topográfica, Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo: fabio.echeverri@correounivalle.edu.co.



## **Abstract**

*The average demand of cotton in Colombia from 2006 has fallen from 80 000 tons / year to 30 000, this appears for the strong climate changes, where there meets reflected the bad quality of the fiber of spinning. In this work has identified the effects of the water stress of the cotton crop in the Municipality Villavieja, Huila. With the implementation of 12 images satellites, it was possible to observe the effects of the water stress, the series Landsat 4 TM, 5 TM and 7 ETM+ were implemented with epochs understood by the climatic periods of Colombia (dry and humid). The images were processed in the software Erdas Imagine 9.2, different transformations were applied to them: radiance, reflectance, Normalized Difference Vegetation Index and Normalized Difference Water Index, to finally calculate the Normalized Differential Drought Index. Also applied the Crop Water Stress Index (CWSI) with information of superficial temperature. The validation gave like proved a correlation of  $R^2 = 0.9271$  and  $0.4757$  for dry and humid season, respectively. The Index CWSI has demonstrated to be useful in the programming irrigation. When the threshold value is determinate in the different phenological stages of the crops, it is used to avoid hurts for water stress and decrease in the production of the crops.*

**Keywords:** CWSI index, water stress, remote sensing, infrared thermometry, cotton crops.

## Introducción

La demanda global de recursos hídricos se incrementa de forma paralela al desarrollo social y económico, y a la par del crecimiento poblacional en el planeta (Wu *et al.*, 2014); así, se aumenta la demanda de necesidades alimenticias y se intensifica la competición por el agua entre la agricultura, la industria y el medio ambiente (Yan & Wu, 2014). La disponibilidad de agua es un factor determinante en la producción potencial de la agricultura (Yuan *et al.*, 2013), convirtiéndose en uno de los sectores consumidores más grandes de recursos hídricos en el mundo, ya que consume cerca del 70 % del agua extraíble en distintos países y más del 90 % en países con suelos áridos (Parvizi, Sepaskhah & Ahmadi, 2014).

Los cultivos de algodón ocupan el sexto puesto en consumo de agua a nivel nacional, con un 7 % de aguas superficiales (Arévalo Uribe, 2012). En las últimas décadas se han utilizado diferentes metodologías con el fin de evaluar la calidad de los frutos bajo diferentes estados hídricos (Suárez *et al.*, 2010), y entre las variables utilizadas se destaca la temperatura. Uno de los mecanismos para valorar la temperatura es hacer uso de la información térmica en un cultivo, lo que permitiría obtener el estado hídrico a partir de sus dimensiones espaciales (Luquet *et al.*, 2003). En ese sentido, los estudios con termografía infrarroja en los temas de estrés hídrico son una herramienta útil para darle una mejor distribución al suministro de agua (O'Shaughnessy *et al.*, 2011).

Por los fuertes cambios climáticos, en las regiones que cultivan algodón se presentan pérdidas de miles de toneladas, que se

ven reflejadas en los indicadores económicos del sector (Conalgodón, 2012).

Desde el primer lanzamiento de satélites meteorológicos y de observación, el procesamiento de imágenes satelitales, junto con datos estacionarios, ha sido considerado como un método eficaz para obtener información de condiciones hídricas a diferentes escalas espaciales y temporales (Méndez-Barroso, Garatuza-Payán & Vivoni, 2008).

Uno de los métodos más utilizados es el índice de estrés hídrico (CWSI, por la sigla en inglés de *crop water stress index*), que vincula la temperatura de cubierta con el estrés hídrico (González-Dugo *et al.*, 2006). También se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por la sigla en inglés de *normalized difference vegetation index*), uno de los más utilizados en el mundo por su sencillez y simplicidad, que es una transformación digital que combina matemáticamente los niveles digitales de las bandas espectrales que corresponden a la imagen (Méndez-Barroso, Garatuza-Payán & Vivoni, 2008), y el índice diferencial de agua normalizado (NDWI, por la sigla en inglés de *normalized difference water index*), que se utiliza para medir la cantidad de agua presente en la vegetación a través de las reflectancias del infrarrojo cercano y de la banda infrarroja media (Delbart *et al.*, 2005).

## Materiales y métodos

Para este trabajo se emplearon 12 imágenes satelitales Landsat de tres de sus series (4 TM, 5 TM y 7 ETM+). Las imágenes se obtuvieron del servidor Earth





Explorer del USGS Global Visualization Viewer de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por su sigla en inglés), definidas por el path 8 y row 58 que abarca el municipio de Villavieja. Las imágenes seleccionadas corresponden a diferentes épocas, desde el 5 de junio de 1992 hasta el 22 de enero de 2010, con el fin de estudiar los efectos del estrés hídrico. El procesamiento de las imágenes se realizó en el software Erdas Imagine 9.2 y se empleó ArcGIS 10.2 para las salidas gráficas.

### **Zona de estudio**

La zona de estudio fue el municipio de Villavieja, que es el segundo productor de algodón en el departamento de Huila, con una altitud promedio de 384 msnm y una superficie de 670 km<sup>2</sup>.

### **Tratamiento digital de las imágenes**

Las 12 imágenes Landsat fueron sometidas a una etapa de preprocesamiento, en la cual se efectuaron correcciones atmosféricas para minimizar los errores antes de aplicar los diferentes índices.

Se creó una imagen compuesta, donde se unieron las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7 para Landsat 4 TM, 5 TM y 7 ETM, sin incluir la 6, ya que esta última se utilizó para estimar la temperatura superficial. Luego de esto se procedió a realizar un recorte de las imágenes con un archivo de forma poligonal del municipio de Villavieja, que fue transformado a un formato AOI.

Con el recorte ya definido en las 12 imágenes, se continuó con el procesamiento de la información, ya que los valores digitales no presentan ninguna variable

biofísica. Se inició con la conversión de valores digitales a valores de radiancia (ec. 1), que es el total de energía radiada por una superficie en una determinada dirección por unidad de área y por ángulo sólido de medida. Luego de obtener los valores de radiancia, estos se convierten a valores en reflectancia aparente (ec. 2), ya que el cálculo de la reflectancia elimina el efecto coseno de diferentes ángulos cenitales solares producidos por la diferencia de tiempo entre adquisición de datos, y también compensa los diferentes valores de la irradiancia solar exoatmosférica (Chander, Markham & Helder, 2009).

$$L_{\lambda} = \left( \frac{L_{\max} - L_{\min}}{Q_{\max} - Q_{\min}} \right) \times (Q_{\text{cal}} - 1) + L_{\min} \quad (1)$$

Donde  $L_{\max}$  y  $L_{\min}$  son los valores máximos y mínimos de radiancia de cada una de las bandas que componen las imágenes;  $Q_{\max}$  y  $Q_{\min}$  son los valores de píxeles máximos y mínimos cuantificados y calibrados y  $Q_{\text{cal}}$  es la imagen.

$$\rho_k = K\pi \frac{L_{\lambda}}{ESUN * \cos \theta} \quad (2)$$

Donde  $L_{\lambda}$  es la radiancia;  $ESUN$  es la irradiancia solar exoatmosférica;  $\theta$  es el ángulo cenital solar y  $K$  es la distancia Tierra-Sol en unidades astronómicas que se obtiene mediante la ecuación 3.

$$K = 1 + 0.0167 \left[ \sin \frac{2\pi(n - 93,5)}{365} \right]^2 \quad (3)$$



## Aplicación de los índices

Una vez obtenidos los valores de reflectancia de las distintas bandas, se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), el índice diferencial de agua normalizado (NDWI) y el índice diferencial de sequía normalizado (NDDI).

### Índice de vegetación de diferencia normalizada

Para el NDVI se utilizaron la banda roja (3) e infrarroja cercana (4), ya que las plantas sanas absorben la luz roja y reflejan la luz infrarroja. Esta relación permite detectar las plantas sanas con condiciones de humedad normal (Stamatis, Tsadilas & Schepers, 2010), y se calcula con la ecuación 4:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{Red})}{(\rho_{NIR} + \rho_{Red})} \quad (4)$$

Donde  $\rho_{NIR}$  es la reflectancia del infrarrojo cercano y  $\rho_{Red}$  es la banda roja.

### Índice diferencial de agua normalizado

El NDWI (ec. 5) se utilizó para medir la cantidad de agua presente en la vegetación. Para este índice se utilizó la banda infrarroja cercana (4) y la banda del infrarrojo medio (5).

$$NDWI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_{SWIR})}{(\rho_{NIR} + \rho_{SWIR})} \quad (5)$$

Donde  $\rho_{NIR}$  es la reflectancia del infrarrojo cercano y  $\rho_{SWIR}$  es la reflectancia de la banda infrarroja media.

### Índice diferencial de sequía normalizado

El cálculo del NDDI se basa en la diferencia entre el NDVI que contiene información de la vegetación y el NDWI que presenta información sobre los niveles de humedad en el suelo. La ecuación 6 los relaciona de la siguiente forma:

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI} \quad (6)$$

### Cálculo de la temperatura superficial

Para el cálculo de la temperatura superficial es necesario obtener inicialmente la fracción de vegetación ( $f_v$ ) que corresponde a la cantidad de vegetación presente en un pixel, la emisividad ( $e$ ), que es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie, y la temperatura de brillo ( $T_L$ ), que equivale a la temperatura efectiva en el satélite en grados Kelvin.

### Fracción de vegetación

La fracción de vegetación fue calculada utilizando la ec. 7 y se basa en los datos máximos y mínimos obtenidos del cálculo del NDVI; este índice se expresa en valores entre -1,0 y 1,0 (Sancha Navarro, 2010).

$$f_v = 1 - \left[ \frac{(NDVI_{MAX} - NDVI)}{(NDVI_{MAX} - NDVI_{MIN})} \right]^a \quad (7)$$

Donde  $f_v$  es la fracción de uso de la vegetación;  $NDVI_{MAX}$  es el valor máximo del NDVI;  $NDVI_{MIN}$  es el valor mínimo del NDVI y  $a$  es el valor de la orientación de la hoja de la planta (0,6).



## Emisividad

Posteriormente fue calculada la emisividad con la ecuación 8, y se usaron los datos obtenidos en el cálculo del NDVI y la fracción de vegetación (López García & Caselles Miralles, 1986).

$$\varepsilon = fv * \varepsilon_v + (1 - fv)\varepsilon_s \quad (8)$$

Donde  $\varepsilon$  es la emisividad;  $\varepsilon_v$  es la emisividad superficial de la vegetación (0,985);  $\varepsilon_s$  es la emisividad superficial del suelo (0,978) y  $fv$  es la fracción de uso de la vegetación.

## Temperatura de brillo

Este parámetro se calculó con los valores de radiancia de la banda térmica obtenidos en el preprocesamiento de las imágenes, y para ello se utilizó la ecuación 9. El resultado se presenta en grados Kelvin (Santana Rodríguez, Escobar Jaramillo & Capote, 2010).

$$T_L = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)} \quad (9)$$

Donde  $T_L$  es el brillo de temperatura en el sensor en grados Kelvin;  $L_\lambda$  es la radiancia de la banda térmica;  $K_1$  y  $K_2$  son constantes: 666,09  $Wm^2sr^{-1}um^{-1}$  y 1282,71 K respectivamente.

## Temperatura superficial

La temperatura superficial es el resultado final en esta serie de procesos y se obtuvo mediante las ecuaciones 10 y 11. Su resultado está dado en grados centígrados.

$$\rho = \frac{h * c}{\sigma} \quad (10)$$

Donde  $h$  es la constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$ );  $c$  es la velocidad de propagación de la luz ( $2,998 \times 10^8$ ) y  $\sigma$  es la constante de Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23}$ ).

$$T_s = \left[ \frac{T_L}{1 + \left(\frac{\lambda T_L}{\rho}\right)} \ln \varepsilon \right] - 273.15 \quad (11)$$

Donde  $T_s$  es la temperatura superficial;  $T_L$  es el brillo de temperatura en el sensor en grados Kelvin y  $\lambda$  es la longitud de onda media de la banda térmica ( $11,5 \times 10^{-6}$ ).

## Índice de estrés hídrico a partir de la temperatura superficial

El índice de estrés hídrico (CWSI) se calculó mediante el uso de la ecuación 12, donde  $T_s$  es la temperatura del cultivo;  $T_w$  es la temperatura media del aire y  $T_{dry}$  es un estimado de la máxima temperatura. De acuerdo con la gobernación del Huila, en el municipio de Villavieja la temperatura promedio del aire es de 32 °C.

$$CWSI = \left( \frac{T_s - T_w}{T_{dry} - T_w} \right) \quad (12)$$

## Clasificación supervisada

Para identificar las diferentes coberturas de la tierra presentes en la zona de estudio, se aplicó una clasificación supervisada mediante el uso del software Erdas a partir de las salidas generadas por los diferentes modelos.

## Validación

En la realización de este proyecto, al no contar con la posibilidad de obtener información primaria en campo, se utilizaron los datos de temperatura, humedad y precipitación registrados mensualmente a partir del año 1998 en una estación meteorológica de la Federación Nacional de Arroceros ubicada en el municipio de Aipe, vecino de Villavieja. Estos datos fueron normalizados y se filtraron para obtener solo la temperatura y los años de acuerdo con las imágenes.

## Resultados y discusión

### Tratamiento digital de las imágenes

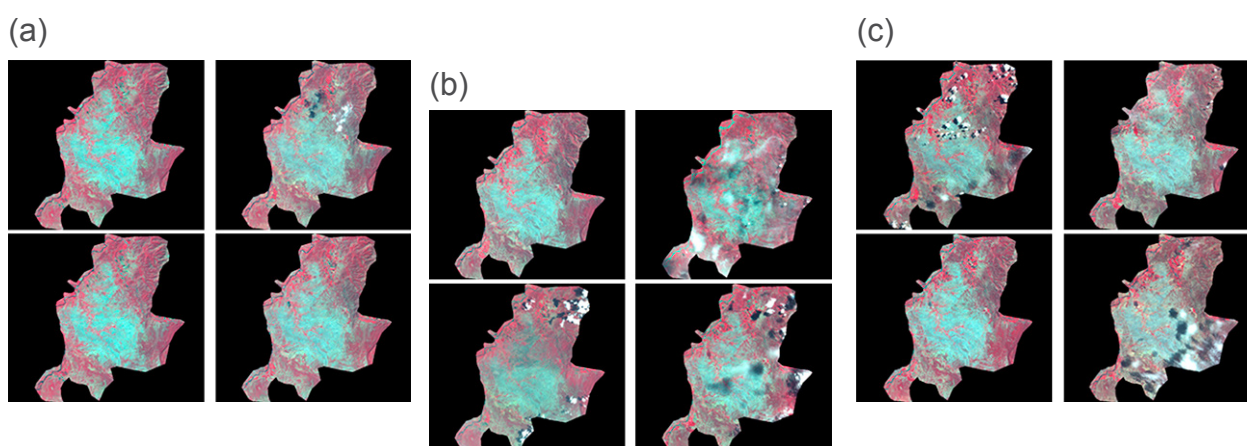
El recorte realizado con un AOI basado en un archivo de formato shp georreferenciado (WGS 84, UTM zona 18) del municipio de Villavieja arrojó resultados satisfactorios. En estos recortes, las nubes presentes en las imágenes no alteraron sus valores digitales y tampoco opacaron la zona de estudio.

Como resultado del cálculo de reflectancia se obtuvieron 12 imágenes (fig. 1) para tres de las cuatro épocas climáticas presentes en la zona andina de nuestro país; los valores máximos y mínimos de las imágenes estaban entre -1 y 1.

### Índices

El resultado de los índices se interpretó visualmente. El NDVI (fig. 2) presenta las zonas con contenido de humedad en tonos grises oscuros y negros, y el contenido de vegetación y suelo en colores grises claros y blancos; por el contrario, el NDWI (fig. 3) presenta las zonas con contenido de humedad en color blanco.

Los índices NDVI y NDWI se procesaron con el fin de conocer las variaciones presentes en las 12 imágenes respecto al contenido de humedad y vegetación; los tres muestran el comportamiento de la humedad presente en el suelo y la cobertura vegetal, con cambios considerables en las extensiones de llanuras aluviales y vegetación en las tres temporadas. Con esto, tenemos que el uso de sensores



**Figura 1.** Valores de reflectancia: a) temporada seca, 21 de dic. - 21 de mar.; b) temporada húmeda, 22 de mar. - 21 de jun.; c) temporada seca, 2 de de jun. - 21 de sep.

Fuente: elaboración propia.



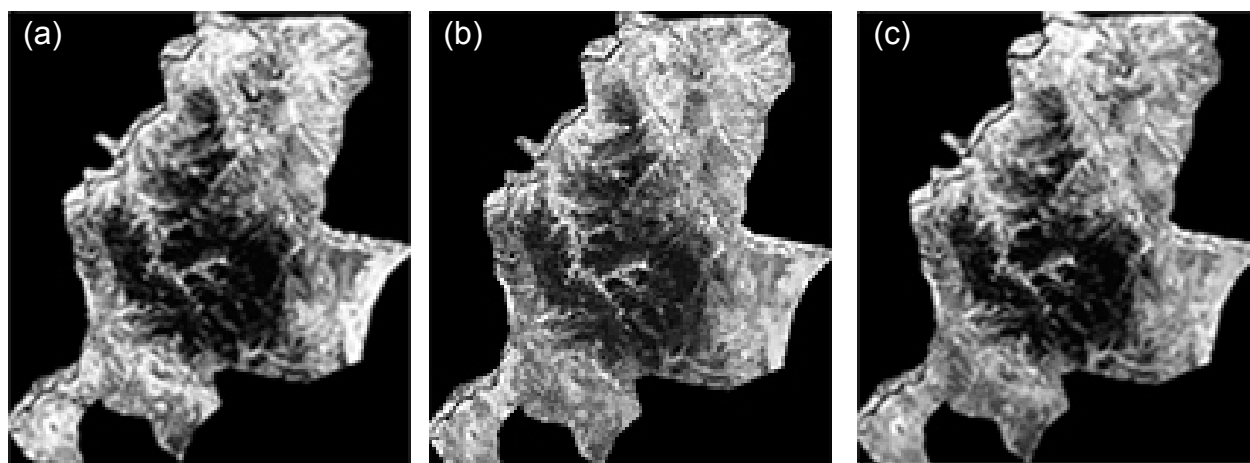


remotos para el monitoreo de la escasez de agua en el campo puede resultar útil en las regiones semiáridas donde el agua es, a menudo, el factor más limitante de la producción (Stamatis, Tsadilas & Schepers, 2010).

El índice de vegetación NDVI y el de agua NDWI son modelos desarrollados para trabajar con bandas contenidas en los productos de sensores, los cuales permiten conocer la presencia de cuerpos de agua en una superficie (fig. 2 y 3). Un análisis visual de las imágenes del NDWI indica

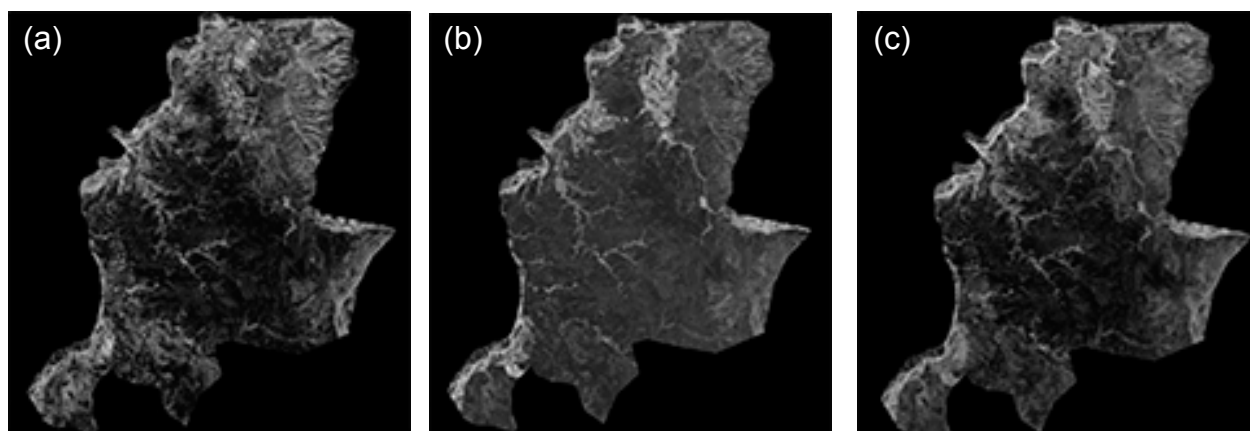
que la temporada húmeda (b), muestra más cantidad de agua en la superficie vegetal.

Por último, se calculó el índice diferencial de sequía normalizado (NDDI) (fig. 4), que combina los índices NDVI y NDWI. Se observó que se presenta más sequía en la temporada seca, comprendida entre el 21 de diciembre y el 21 de marzo, y aunque este resultado se ve alterado por la zona que comprende al desierto de la Tatacoa, se pueden ver los cambios que se presentan con más intensidad en las



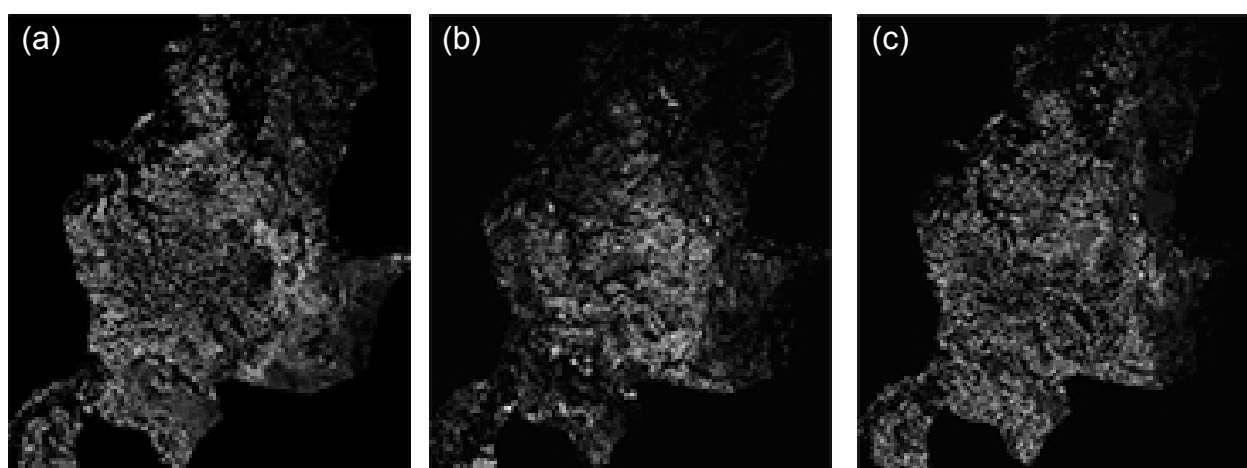
**Figura 2.** NDVI: a) temporada seca, 21 de dic. - 21 de mar.; b) temporada humedad, 22 de mar. - 21 de jun.; c) temporada seca, 2 de jun. - 21 de sep.

*Fuente: elaboración propia.*



**Figura 3.** NDWI: a) temporada seca, 21 de dic. - 21 de mar.; b) temporada húmeda, 22 de mar. - 21 de jun.; c) temporada seca, 2 de jun. - 21 de sep.

*Fuente: elaboración propia.*



**Figura 4.** NDDI: a) temporada seca, 21 dic. - 21 de mar.; b) temporada húmeda, 22 de mar. - 21 de jun.; c) temporada seca, 2 de jun. - 21 de sep.

Fuente: elaboración propia.

épocas secas que en la temporada húmeda. Luquet *et al.* (2003) y O'Shaughnessy *et al.* (2011) sugieren que para aplicar la información de termografía infrarroja digital en los temas de estrés hídrico en un cultivo y poder obtener el estado hídrico se necesita saber las dimensiones del cultivo. En comparación con este estudio, debido a la resolución de las imágenes Landsat, no se identifican los cultivos de algodón y

los modelos se aplicaron a todo el municipio de Villavieja, lo que generó variaciones en los cálculos del índice CWSI.

### Temperatura superficial

El cálculo de la temperatura superficial (fig. 5) arrojó los valores presentados en la tabla 1, los cuales se presentan en grados centígrados y evidencian que en la temporada húmeda la temperatura es menor.

**Tabla 1.** Temperatura superficial

Temperatura superficial	Máxima	Mínima
Temporada seca (dic. 21 - mar. 21)	31,556 °C	29,863 °C
Temporada húmeda (mar. 22 - jun. 21)	30,925 °C	29,304 °C
Temporada seca (jun. 22 - sep. 21)	31,415 °C	29,693 °C



Una vez alcanzado el umbral del CWSI es recomendable programar el riego para evitar los daños por estrés hídrico y la disminución en el rendimiento de los cultivos. El umbral para el algodón es de 0,3 pero los valores obtenidos con el CWSI (tabla 2) son superiores al umbral en las temporadas secas, lo que evidencia presencia de estrés hídrico. Claro está que estos valores se ven alterados por la presencia de coberturas diferentes a la del algodón y solo en la temporada húmeda se registra un CWSI de 0,18 lo cual indica que la superficie no está estresada. Yuan *et al.* (2004) afirman que el CWSI es el indicador más utilizado para cuantificar situaciones de estrés hídrico, ya que está basado en la temperatura del dosel de la superficie. Esto se comprobó al calcular la temperatura superficial y aplicar la fórmula CWSI (ec. 12), lo que arrojó como resultado el estado de estrés de las tres épocas estudiadas (tabla 2).

### Clasificación supervisada

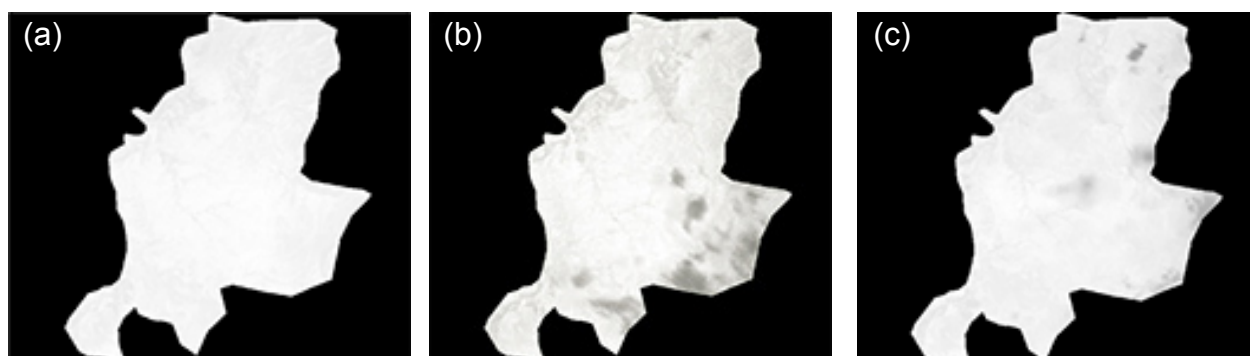
En la clasificación supervisada (fig. 6) se eligieron dos temporadas: la seca, del 21

**Tabla 2.** Índice de estrés hídrico a partir de la temperatura superficial

Temporada seca (dic. 21 - mar. 21)	0,80
Temporada húmeda (mar. 22 - jun. 21)	0,18
Temporada seca (jun. 22 - sep. 21)	0,50

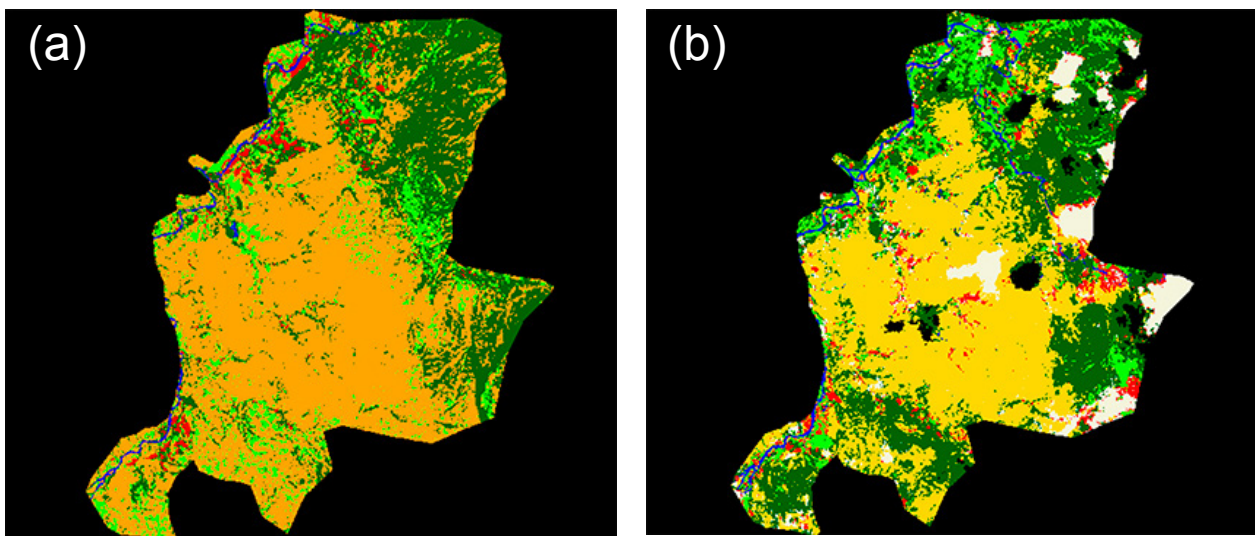
de diciembre al 21 de marzo, que es la temporada más árida del país, y la húmeda, que va desde el 22 de marzo hasta el 21 de junio.

En la imagen *a* se puede observar que el desierto de la Tatacoa (naranja) se hace más visible y la cobertura vegetal (verde oscuro) más escasa, en comparación con la imagen *b*. En la imagen *b* se pueden observar los efectos de la temporada húmeda, ya que se hace más evidente la presencia de cuerpos de agua (azul) y la vegetación (verde oscuro) más abundante; también se aprecia la presencia de nubes (blanco).



**Figura 5.** a) temporada seca, 21 dic. - 21 de mar.; b) temporada húmeda, 22 de mar. - 21 de jun.; c) temporada seca, 2 de jun. - 21 de sep.

Fuente: elaboración propia.



**Figura 6.** Clasificación supervisada: a) temporada seca, 21 dic. - 21 de mar.; b) temporada húmeda, 22 de mar. - 21 de jun.

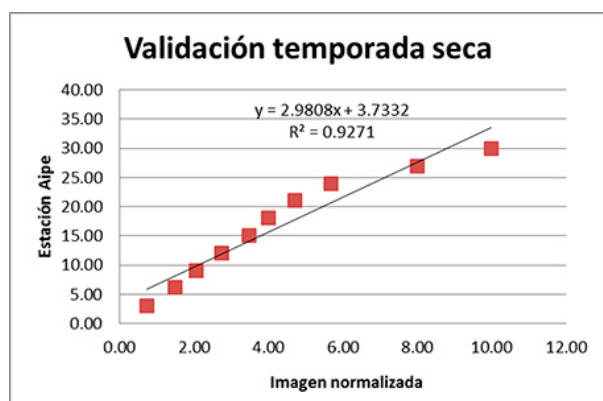
Fuente: elaboración propia.

## Validación

La validación se realizó a partir de la información climatológica proveniente de la estación meteorológica Aipe, ubicada en el municipio con el mismo nombre, vecino del municipio de Villavieja. El problema generado en este estudio fue que no se obtuvieron los datos por días para hacer una comparación con el día de toma de imágenes, por lo que los datos obtenidos de las estaciones fueron mensuales. Se eligieron los meses de marzo y junio para evaluar la temporada seca y húmeda respectivamente.

Con la regresión lineal de los datos de las estaciones y la temperatura superficial en la temporada seca (fig. 7), se obtuvo una pendiente en la que cada incremento unitario de la temperatura de la imagen hace que la temperatura registrada en las estaciones aumente 2,98 °C. La ordenada de origen arrojó un valor de 3,73 °C, lo que significa que con las temperaturas

mínimas registradas en los valores de pixel, el valor inicial en las estaciones será el de la ordenada. En general, estos datos muestran una relación positiva y se puede decir que son confiables, obteniendo un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 0,9271.



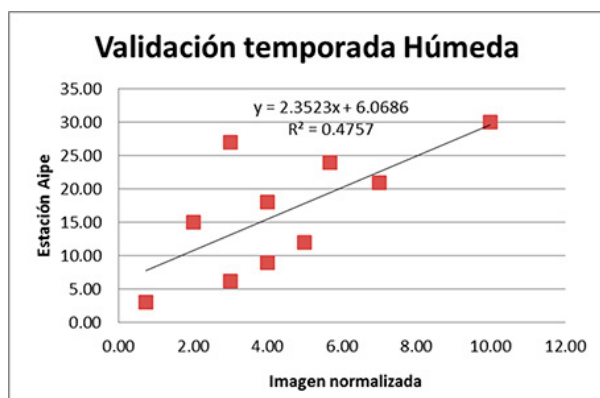
**Figura 7.** Validación temporada seca

Fuente: elaboración propia.





A diferencia de la regresión lineal de la temporada seca, la regresión lineal de la temporada húmeda (fig. 8) no arrojó resultados satisfactorios, no se evidencia una relación en los datos y se consideran dispersos, además de obtener un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) = 0,4757.



**Figura 8.** Validación temporada húmeda.

Fuente: elaboración propia.

## Conclusiones

En este estudio, el estado del arte fue la herramienta esencial que permitió el desarrollo óptimo de cada uno de los productos. Gracias a esta fase se pudieron conocer modelos matemáticos aplicables a las imágenes satelitales, en este caso, del sensor Landsat en tres de sus series (4 TM, 5 TM y 7 ETM). Esto ayudó a la interpretación de los datos obtenidos, permitiendo realizar un análisis visual y estadístico.

La implementación de imágenes satelitales en la estimación e identificación de fenómenos climáticos ha tenido gran auge en las últimas décadas. Las bandas térmicas han sido ampliamente utilizadas para estudiar el estrés hídrico, mejor conocido como sequía. Así, vemos que

la termometría infrarroja es una herramienta sencilla, práctica, no destructiva y confiable que se ha aplicado en diversos estudios agrícolas para la programación del riego, y también es útil para la predicción de rendimientos.

Es de destacar la utilidad del índice de vegetación normalizada (NDVI) y el índice diferencial de agua normalizado (NDWI) para estimar la cantidad y calidad de los cultivos y de los cuerpos de agua, debido a su gran sencillez y su fácil adaptación a diferentes superficies del globo terrestre, aunque es necesario emplear condicionales a la hora de generar los modelos en Erdas, ya que con algunas operaciones se indeterminan y no arrojan resultados. Aunque en general los resultados obtenidos son satisfactorios, se considera pertinente y, en algunos casos, necesario el uso de patrones climatológicos espacio-temporales para poder discriminar, a una escala mayor, las zonas que han sufrido sequía. El método del índice de estrés hídrico a partir de la temperatura superficial (CWSI) ha demostrado ser muy útil a la hora de programar los riegos. Cuando se determina el valor umbral en las diferentes etapas fenológicas del cultivo, este se emplea para evitar daños por estrés hídrico y disminución en la producción.

También es importante conocer las condiciones climáticas de la zona. En este caso, para Colombia, fue necesario establecer las temporadas de lluvia y de esta manera analizar tres épocas distintas: la primera es la temporada seca, entre diciembre y marzo, influenciada por las celdas de alta presión subtropical, que se conoce como la más desértica del país; la segunda, del 21 de marzo al 21 de junio, es la temporada húmeda, que se presenta con mayor

intensidad hacia el centro y sur del país; la tercera es la segunda temporada seca del año, que está comprendida entre el 21 de junio y el 21 de septiembre, y es seca especialmente en la zona central y sur del país. Estas temporadas se vieron presentes en los datos, donde se registraron diferencias en los valores de temperatura y humedad según la temporada.

A pesar de contar con los avances tecnológicos y con la constante actualización de

los sensores y satélites, es imprescindible disponer de datos de muestra tomados en campo, ya que estos permiten realizar una valoración y saber qué tan confiables son los productos obtenidos.

Este trabajo brinda elementos para futuras evaluaciones sobre los cultivos de algodón ante el cambio climático, y los resultados pueden aplicarse para acciones de protección y conservación.





## Bibliografía

- Arévalo Uribe, D. (2012). *Una mirada a la agricultura de Colombia desde su huella hídrica*. Cali: World Wildlife Fund (WWF) Colombia. Recuperado de <http://www.huellahidrica.org/Reports/Arevalo-2012-HuellaHidricaColombia.pdf>.
- Chander, G., Markham, B. L. & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), 893-903. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.01.007>.
- Confederación Colombiana del Algodón (Conalgodón). (2012). *Avances de la estrategia exportadora de algodón en Colombia*. Recuperado de <http://conalgodon.com/sites/default/files/Revista%20Exportaci%C3%B3n.pdf>.
- Delbart, N., Kergoat, L., Le Toan, T., Lhermitte, J. & Picard, G. (2005). Determination of phenological dates in boreal regions using normalized difference water index. *Remote Sensing of Environment*, 97(1), 26-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2005.03.011>.
- González-Dugo, M. P., Moran, M. S., Mateos, L. & Bryant, R. (2006). Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. *Irrigation Science*, 24(4), 233-240.
- López García, J. & Caselles Miralles, V. (1986). Aplicación de la teledetección al estudio de la temperatura superficial del mar balear y golfo de Valencia. *Cuadernos de Geografía*, 38, 75-92. Recuperado de <http://roderic.uv.es/bitstream/handle/10550/30821/75-92.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Luquet, D., Begue, A., Vidal, A., Clouvel, P., Dautzat, J., Olioso, A., Gu, X. F. & Tao, Y. (2003). Using multidirectional thermography to characterize water status of cotton. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 411-421. [http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00131-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00131-1).
- Méndez-Barroso, L. A., Garatuza-Payán, J. & Vivoni, E. R. (2008). Quantifying water stress on wheat using remote sensing in the Yaqui Valley, Sonora, Mexico. *Agricultural Water Management*, 95(6), 725-736. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2008.01.016>.



- O'Shaughnessy, S. A., Evett, S. R., Colaizzi, P. D. & Howell, T. A. (2011). Using radiation thermography and thermometry to evaluate crop water stress in soybean and cotton. *Agricultural Water Management*, 98(10), 1523-1535. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2011.05.005>.
- Parvizi, H., Sepaskhah, A. & Ahmadi, S. (2014). Effect of drip irrigation and fertilizer regimes on fruit yields and water productivity of a pomegranate (*Punica granatum* (L.) cv. Rabab) orchard. *Agricultural Water Management*, 146, 45-56. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2014.07.005>.
- Sancha Navarro, E. F. (2010). El estudio de los índices de vegetación como base para conocer las relaciones entre la vegetación y el clima. En: Ojeda, J., Pita, M.F. y Vallejo, I. (Eds.), *Tecnologías de la información geográfica: la información geográfica al servicio de los ciudadanos* (pp. 1095-1108). Sevilla: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Sevilla. Recuperado de [http://www.age-geografia.es/tig/2010\\_Sevilla/ponencia3/SANCHA.pdf](http://www.age-geografia.es/tig/2010_Sevilla/ponencia3/SANCHA.pdf).
- Santana Rodríguez, L. M., Escobar Jaramillo, L. A. & Capote, P. A. (2010). Estimación de un índice de calidad ambiental urbano, a partir de imágenes de satélite. *Revista de Geografía Norte Grande*, 45, 77-95. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022010000100006>.
- Stamatis, S., Tsadilas, C. & Schepers, J. S. (2010). Ground-based canopy sensing for detecting effects of water stress in cotton. *Plant and Soil*, 331(1/2), 277-287. <http://www.jstor.org/stable/24130564>.
- Suárez, L., Zarco-Tejada, P. J., González-Dugo, V., Berni, J. A. J., Sagardoy, R., Morales, F. & Fereres, E. (2010). Detecting water stress effects on fruit quality in orchards with time-series PRI airborne imagery. *Remote Sensing of Environment*, 114(2), 286-298. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.09.006>.
- Wu, B., Jiang, L., Yan, N., Perry, C. & Zeng, H. (2014). Basin-wide evapotranspiration management: Concept and practical application in Hai Basin, China. *Agricultural Water Management*, 145, 145-153. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.09.021>.







- Yan, N. & Wu, B. (2014). Integrated spatial-temporal analysis of crop water productivity of winter wheat in Hai Basin. *Agricultural Water Management*, 133, 24-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.11.001>.
- Yuan, G., Luo, Y., Sun, X. & Tang, D. (2004). Evaluation of a crop water stress index for detecting water stress in winter wheat in the north China Plain. *Agricultural Water Management*, 64(1), 29-40. [http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774\(03\)00193-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00193-8).
- Yuan, M., Zhang, L., Gou, F., Su, Z., Spiertz, J., & Van der Werf, W. (2013). Assessment of crop growth and water productivity for five C3 species in semi-arid Inner Mongolia. *Agricultural Water Management*, 122, 28-38. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2013.02.006>.



# Detección de nubes a partir de redes neuronales perceptrón multicapa en imágenes Landsat

## *Cloud detection from multilayer perceptron neural networks on Landsat images*

Gabriela Lucia Chamorro Yela<sup>1</sup>, Francisco Luis Hernández Torres<sup>2</sup>

“Cómo citar este artículo: Chamorro Yela, G. y Hernández Torres, F. (2017). Detección de nubes a partir de redes neuronales perceptrón multicapa en imágenes Landsat. *Análisis Geográficos*, 52, 107-123.

### Resumen

Se presenta la metodología empleada para detectar nubes en imágenes del satélite Landsat, las cuales complican el uso de datos en el dominio óptico de los satélites puesto que influyen en su análisis, causan corrección atmosférica inexacta, sesgan los valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y generan errores en la clasificación de la cubierta terrestre y confusión en los cambios de coberturas vegetales. El modelo obtenido se convierte en una herramienta de apoyo para posteriores estudios en múltiples disciplinas, ya que facilita el proceso de análisis de diferentes fenómenos o estudios que se estén desarrollando. Para esto, se tomó como ejemplo la zona comprendida entre las cordilleras Central y Occidental cercana al municipio de Puerto Berrío, Antioquia, de donde se tiene información referente a 12 imágenes del satélite Landsat 7. Para la detección de nubes se empleó el análisis de redes como una herramienta potente para clasificar diferentes elementos, hacer un proceso computacional más eficiente, integrar información desde múltiples fuentes para incorporar nuevas características y además prescindir del uso de modelos estadísticos, a diferencia de otros enfoques. El proceso permitió entrenar la red con un EMC del 0,0339 con 7 neuronas en la capa oculta, con menos de 100 iteraciones para cada una de las imágenes empleadas, y se obtuvo una exactitud del 91%, mejor que los resultados alcanzados con el método de umbrales desarrollado en estudios anteriores, cuya exactitud fue del 87,37%.

**Palabras clave:** Landsat ETM+, redes neuronales, máscara de nubes, cobertura terrestre.

<sup>1</sup> Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo: gabriela.chamorro@correounivalle.edu.co.

<sup>2</sup> Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo: francisco.hernandez@correounivalle.edu.co.



## **Abstract**

*In the following article the methodology comes to detect clouds using Landsat satellite images, which complicates the use of data in the optical domain of the satellites, as influencing their analysis, causing inaccurate atmospheric correction, skewing values index normalized difference vegetation (NDVI), misclassification and land cover changes confusion vegetable coverages. The resulting model becomes a support tool for further studies in multiple disciplines to facilitate the process of analyzing different phenomena or studies being developed. For this is taken as an example, the area between the Central and Occidental mountain ranges near the town of Puerto Berrío, Antioquia, where there is information relating to 12 Landsat 7 satellite images. Cloud detection network analysis is used as a powerful tool to classify different elements, making more efficient computational process, integrating information from multiple sources to incorporate new features and also dispense with the use of statistical models unlike other approaches. The process allowed train the network with EMC 0.0339 with 7 neurons in the hidden layer, with less than 100 iterations for each of the images used. The method obtained an overall accuracy of 91% better than the results achieved with the method of thresholds developed in previous studies, the accuracy was 87.37%.*

**Keywords:** Landsat, neural networks, clouds mask, land cover.

## Introducción

El uso de imágenes de satélite ha tenido gran importancia a escala local, regional y nacional para entender los fenómenos que intervienen en distintas áreas como la agricultura, la geología (Van der Meer *et al.*, 2012), las ciencias forestales (Qi, Li, Liu & Jin, 2014), la gestión del medio ambiente, la gestión del riesgo (Van Westen, 2013) e incluso en la planificación urbana (Behling *et al.*, 2015), debido a su gran potencial en la captura de información. Las nubes y las sombras asociadas a estas imágenes, con frecuencia, obstruyen el área de observación de la superficie terrestre causando valores atípicos en los datos de reflectancia (Fisher & Danaher, 2011; Sano *et al.*, 2007).

Aunque no existe un consenso universal sobre la forma fundamental de clasificar las nubes, generalmente se pueden identificar tres tipos: altas, medias y bajas (Tapakis & Charalambides, 2013), con diferentes dimensiones, opacidad y propiedades. Dentro de las nubes bajas se encuentran los cúmulos, que son relativamente fáciles de identificar debido a su alta reflectancia en las bandas visibles, mientras que las nubes altas como los cirros, de aspecto semitransparente, son mucho más difíciles, ya que parte de la luz que llega a la nube se puede reflejar también en la superficie. La presencia de nubes y sus sombras complica el uso de datos en el dominio óptico de los satélites de observación de la Tierra. El efecto de brillo de las nubes y sus sombras influyen en el análisis de los datos causando corrección atmosférica inexacta y sesgando los valores en los índices de la cubierta terrestre, ya que los niveles digitales de las nubes y las sombras pueden adoptar

una respuesta espectral similar a la de otros objetos presentes en la superficie, y es por esto que pueden generar confusión en el momento de clasificar (Hagolle *et al.*, 2010). Debido a esto, muchos estudios se han desarrollado como insumo para la detección de nubes, las cuales involucran diferentes variables.

Panem *et al.* (2005) integraron modelos radiométricos y geométricos en una máscara con el fin de calcular el estado de confianza para permitir el almacenamiento automático de las nubes que han sido correctamente identificadas, mientras se realiza un proceso iterativo con redes neuronales para aquellas máscaras que han sido mal identificadas, estableciendo nuevos pesos en la capa oculta de la red.

Lewis, Cote y Tatnall (1995) adoptaron una técnica automatizada para la detección de nubes con redes neuronales con el objeto de definir los umbrales que permiten establecer los valores mínimos y máximos correspondientes al borde de la nube y al borde de su sombra respectivamente. Séptimo Torres *et al.* (2003) desarrollaron el algoritmo de retropropagación de Rumelhart para la identificación de nubes considerando, como variables de entrada, la información de brillo y variabilidad de cada pixel; además, crearon como variables de salida las clases de nubes, sombras y áreas de no nube.

Li *et al.* (2012) tuvieron en cuenta el índice tasseled cap (TC) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI, por la sigla en inglés de *normalized difference vegetation index*) para obtener una máscara de nubes de la zona, la cual se evalúa visualmente, y también aplicaron el algoritmo automático de evaluación nubosidad (ACCA).





Walder y Maclaren (2000) desarrollaron un modelo de red neuronal para identificar las categorías de mar, tierra, nube alta y media. Este modelo se compara con dos métodos de detección de nubes: uno es el de la regla empírica de Walder, y el segundo es la función de Gabor. Los resultados indican que la clasificación con redes neuronales tiene una precisión del 80%, lo cual supera los dos métodos mencionados anteriormente.

Li y Tang (2013) desarrollaron dos algoritmos para detección de nubes utilizando las bandas visibles y del infrarrojo cercano. El primer algoritmo se basa en los tres componentes (brillo, verdor y humedad) de la transformación tasseled cap (TC) y el segundo algoritmo de redes neuronales realiza un ajuste de pesos para destacar los índices de verdor y humedad.

Lee *et al.* (1990) implementaron las bandas visibles del Landsat MSS para clasificar la textura de las nubes a partir de redes neuronales, comparándolas con el método del vecino más cercano. Este usa el método matriz de co-ocurrencias de niveles de gris (GLCM) de la imagen para representar las tres clases de nubes (cúmulos, extracúmulos y cirros) como capas de entrada. Los resultados indican que la red neuronal logra mayor precisión en la clasificación que el método del vecino más cercano.

Para detectar las nubes en las imágenes, Zhu y Woodcock (2012) plantean el método de función de máscara (fmask), el cual emplea la reflectancia de las imágenes Landsat TM/ETM + de las bandas 1, 2, 3, 4, 5 y 7; además se considera la temperatura (banda 6), el índice de nieve de diferencia normalizada (NSDI, por la sigla en inglés de *normalized difference*

*snow index*) y el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).

Davis *et al.* (2001) desarrollaron un modelo de detección, para lo cual usaron la banda roja para identificar el brillo de las nubes, la banda infrarrojo térmico para el cálculo de la temperatura y determinaron la blancura de las nubes calculando el NDVI.

Tian *et al.* (1998) plantearon un modelo de red neuronal que atiende las variaciones temporales de las nubes. Para ello utilizaron un modelo gaussiano que simplifica el número de neuronas y facilita el procesamiento de la información; posteriormente calcula el conjunto de parámetros de entrenamiento empleando el enfoque de estimación de máxima verosimilitud (EM).

En este artículo se presenta la metodología empleada para detectar nubes y sombras usando imágenes del satélite Landsat. Inicialmente se obtuvo el NDVI y el tasseled cap, como indicadores de las cubiertas diferentes a las nubes; posteriormente se empleó el análisis de red neuronal perceptrón multicapa (MLP) para la identificación de las cubiertas y la posterior generación de la máscara de nubes.

## Materiales y métodos

Los datos de entrada son 12 imágenes satelitales del Landsat 7 ETM+ correspondientes a los años de 2000, 2001 y 2002, del municipio de Puerto Berrío en Antioquia, disponibles en la página <http://verb.echo.nasa.gov/>. Las características básicas de este sensor se presentan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Características de los datos del sensor Landsat 7

	Descripción	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución (m)
Banda 1	Azul	0,45-0,52	30
Banda 2	Verde	0,53-0,61	30
Banda 3	Rojo	0,63-0,69	30
Banda 4	IRC	0,78-0,90	30
Banda 5	SIR	1,55-1,75	30

Fuente: United States Geological Survey (USGS), 2015.

Durante el proceso de clasificación se llevaron a cabo cuatro pasos principales, que se detallan en los apartados siguientes: 1) preprocesamiento de imágenes, 2) cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizado, 3) transformación tasseled cap, 4) clasificación de la imagen con redes neuronales perceptrón multicapa (MLP), 5) generación de la máscara de nubes y 6) validación del algoritmo.

### Preprocesamiento

Consiste en convertir los valores de la imagen (niveles digitales [ND]) a niveles de radiancia en  $\text{W/m}^2 \text{ sr } \mu\text{m}$  para corregir las anomalías que los afectan, como, por ejemplo, la distorsión del aspecto, las fallas en el sensor y las anomalías atmosféricas. Posteriormente se realiza el cálculo de radiancia a reflectancia para convertir los ND en parámetros físicos, y de esa manera conocer el comportamiento físico de una cubierta observada de modo absoluto. Estas correcciones se hacen con el fin de que la información que proporcionan los ND sea confiable y lo más parecida a la realidad de la zona.

### Cálculo del índice de vegetación de diferencia normalizada

Se implementa para mejorar la discriminación de cubiertas vegetales, medir el vigor de las plantas y la producción de la biomasa (Gitelson, Peng & Huemmrich, 2014). Además caracteriza la evolución del estado del suelo a lo largo del tiempo debido a los cambios en su uso, estación fenológica, situación hídrica del territorio y ambiente climático de la zona. Este índice se deriva de la combinación de bandas captadas en la zona del rojo y del infrarrojo cercano del espectro del satélite Landsat 7 (ecuación 1).

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (1)$$

Donde:

**NDVI** = índice de vegetación de diferencia normalizado

**NIR** = reflectancia de la banda infrarrojo cercano

**R** = reflectancia de la banda roja



Los valores obtenidos del NVDI varían entre -1 y 1, donde los valores positivos corresponden a zonas de vegetación, puesto que las plantas absorben fuertemente la radiación en la región visible del espectro, mientras que los valores negativos generados por una mayor reflectancia en el infrarrojo cercano pertenecen a nubes, nieve, agua, zonas de suelo desnudo y rocas (Hmimina *et al.*, 2013).

### ***Cálculo de la transformación tasseled cap***

El TC se emplea para analizar y representar cambios de vegetación y de desarrollo urbano detectados por el sensor del satélite Landsat ETM+. Reduce la información contenida en las bandas multispectrales azul, verde, rojo, infrarrojo cercano y medio a tres componentes principales: brillo, verdor y humedad. La transformación tasseled cap se puede expresar empleando la ecuación 2:

$$TWC = (B1 * 0.1509) + (B2 * 0.1973) + (B3 * 0.3279) + (B4 * 0.3406) + (B5 * 0.7112) + (B7 * 0.4572) \quad (2)$$

Donde:

**TWC** = tasseled cap

**B1** = banda azul del Landsat 7 ETM+

**B2** = banda verde del Landsat 7 ETM+

**B3** = banda roja del Landsat 7 ETM+

**B4** = banda infrarrojo cercano del Landsat 7 ETM+

**B5** = banda infrarrojo medio Landsat 7 ETM+

**B7** = banda infrarrojo cercano del Landsat 7 ETM+

### ***Clasificación de la imagen con redes neuronales perceptrón multicapa***

La red perceptrón multicapa (MLP) se caracteriza por su capacidad de procesamiento. Su potencial reside en la habilidad para entrenar la red y superar aquellas con una sola capa de salida, y por ello ha demostrado su capacidad para trabajar con éxito en un amplio rango de aplicaciones, incluyendo clasificación de imágenes, sistemas de base de conocimiento, codificación de información y muchos otros problemas de clasificación y percepción (Besogain Olabe, 2008). Para su configuración se definen los siguientes parámetros: el número de capas, el número de neuronas por capa y el algoritmo de aprendizaje.

#### **Número de capas**

Para una red MLP se recomienda utilizar tres capas: una entrada, una capa de salida y una capa oculta (Caicedo & López, 2009). El utilizar más de una capa oculta aumenta drásticamente la carga computacional de la red, razón por la cual se plantea una configuración de tres capas.

En la capa de entrada se presentan a la red los datos que, con certeza, corresponden al fenómeno que se desee identificar. En este sentido, se realiza un muestreo de más de cincuenta puntos sobre las coberturas de nubes, sombras, vegetación, agua y zona urbana, para identificar el valor de cada pixel por cada una de ellas, en las bandas visibles, infrarrojo cercano, el NDVI y las tres componentes del tasseled cap (brillo, verdor y humedad), para un total de 8 posibles patrones de entrenamiento con los cuales se podría entrenar la red.



Las muestras fueron obtenidas considerando dos parámetros con una cantidad igual de puntos o muestras por clase para evitar tendencias en la clasificación y que correspondieran a diferentes fechas.

En la capa oculta se condensan las variables de la capa de entrada con los respectivos pesos asignados aleatoriamente; estos reflejan la conexión y fortaleza entre las neuronas. Posteriormente se aplica una función de transferencia o de activación, la cual asocia aleatoriamente un peso a cada una de las variables de entrada y es responsable de la bondad del comportamiento de la red neuronal. Para este caso, la función a emplear es de tipo sigmoideal (ecuación 3), pues garantiza la capacidad de procesamiento no lineal (Flórez & Fernández, 2008).

$$Y_n = f(x) = Th(x) = \frac{e^{2x} - 1}{e^{2x} + 1} \quad (3)$$

Donde:

**Y<sub>n</sub>, f, Th(x)** = respuesta ante la entrada x

**x** = valor de entrada al nodo

**n** = número que identifica la capa correspondiente a la neurona

La capa de salida muestra la respuesta de la red a una entrada. En ella se utiliza la función de activación tipo lineal (ecuación 4) y se definen dos salidas (nube y cualquier otra cobertura), que puede ser sombra, vegetación, agua o zona urbana, etc.

$$Y_n = f(x) = x \quad (4)$$

### Número de neuronas en cada capa

Cada capa de la red está compuesta por neuronas que permiten su funcionamiento; así, por ejemplo, en la capa de entrada corresponden a los 8 patrones de entrenamiento, y por lo tanto para ella se define un máximo de 8 neuronas.

Para identificar si el número de neuronas de la capa de entrada era adecuado, se realizó el entrenamiento de varias redes neuronales, definiendo tres configuraciones diferentes (tabla 2). Donde B1 hasta B4 hacen referencia a las bandas azul, verde, roja e infrarrojo cercano del Landsat ETM+ respectivamente, y las siglas NDVI, B, V y H corresponden al índice de vegetación y a los tres componentes de la transformación tasseled cap (brillo, verdor y humedad).

**Tabla 2.** Configuraciones para la capa de entrada

Configuración	N° de neuronas en la capa de entrada	B1	B2	B3	B4	NDVI	B	V	H
1	4	X	X	X	X				
2	4					X	X	X	X
3	8	X	X	X	X	X	X	X	X





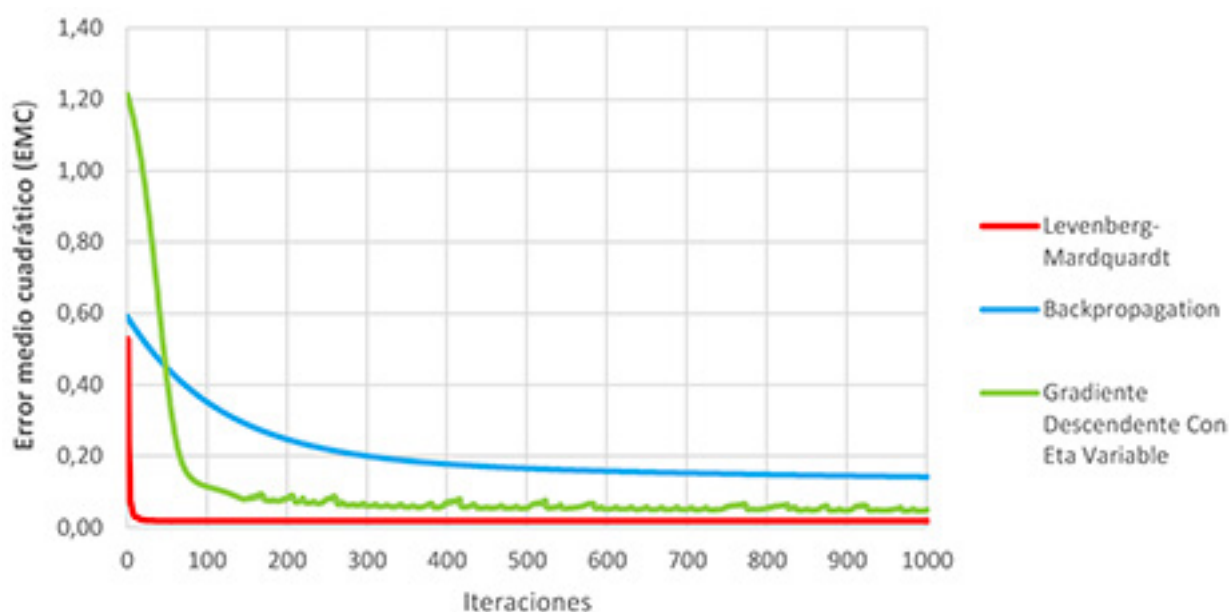
En el caso del número de neuronas para la capa oculta, se evaluó su funcionamiento con la mitad de la dimensión del vector de entrada, es decir, se inició el proceso con tres neuronas y se fueron aumentando paulatinamente, hasta verificar que su desempeño mejorara utilizando el error medio cuadrático (EMC) como indicador. En el momento en que los errores no decrecieron sustancialmente, se definió el número de neuronas que conformaría esta capa.

En la capa de salida se definen dos neuronas: la primera se especializa en la detección de nubes, mientras que la otra se encarga de la clasificación de otras coberturas diferentes.

## Algoritmos de aprendizaje

Para determinar el algoritmo de aprendizaje que configurará la red, se evaluó el rendimiento de los algoritmos: backpropagation, gradiente descendente con eta variable y Levenberg-Marquardt. El criterio de decisión se fundamenta en la velocidad de convergencia de cada uno de ellos durante el proceso de aprendizaje, es decir, hacer que los pesos sinápticos de la red se adapten de una forma más eficiente y rápida, buscando el menor EMC.

La figura 1 muestra el comportamiento del EMC de validación con respecto al número de iteraciones.



**Figura 1.** Rendimiento de los algoritmos de aprendizaje de la red respecto al número de iteraciones y el EMC

*Fuente: elaboración propia.*

## **Generación de la máscara de nubes**

Finalmente se realizó la simulación con cada variable utilizando la red obtenida. Estas variables, al estar estructuradas de forma matricial, fueron organizadas en forma de vector para poder realizar la simulación. El resultado de esta simulación fue una matriz de dos columnas por el total de píxeles que componen la imagen con valores de ceros y unos, donde el valor cero indica no nube y el valor de uno expresa presencia de nubes. Posterior a esto se reorganizaron los datos para recuperar la forma de matriz y se hizo una reclasificación de los valores, en la cual las nubes se establecieron como uno y el resto de clases se definieron como cero, obteniendo de esta manera la máscara de nubes.

## **Validación**

La validación de máscaras de nubes es un proceso complejo, principalmente por la falta de máscaras de nubes confiables para comparar (Zhu & Woodcock, 2012). Debido a esto, la evaluación de la calidad de un producto de máscara de nubes debe considerarse como una comparación de productos, en lugar de una validación.

En este estudio, el proceso de validación consistió en la implementación de diversos mecanismos de comparación entre los productos de máscaras de nubes de RNA y el método de umbrales empleados en anteriores estudios. Estos corresponden a comparaciones visuales e índices de error y concordancia.

## **Resultados**

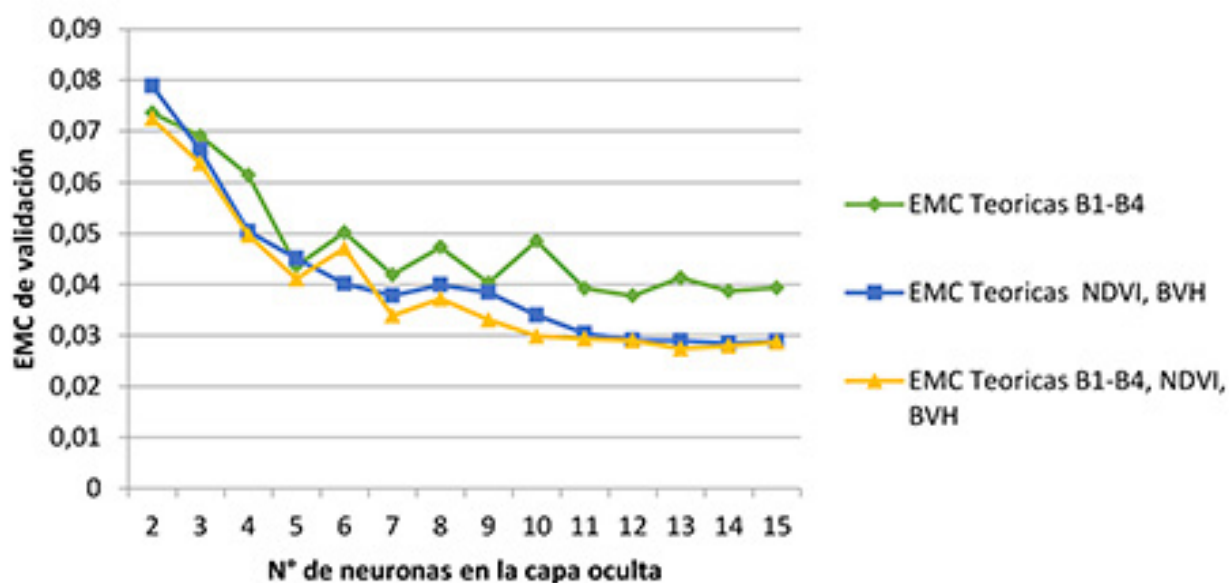
### **Configuración de la red neuronal**

Como se mencionó anteriormente, se definieron 8 posibles patrones en la capa de entrada (tabla 2). A partir de los datos de entrenamiento, se realizó el proceso de aprendizaje con diferente número de neuronas en la capa oculta, con el fin de identificar qué configuración permite obtener un menor EMC. El cálculo del EMC se realizó a partir del 30% del total de muestras empleadas para el entrenamiento.

La figura 2 muestra el comportamiento del EMC de validación con respecto al número de neuronas en la capa de entrada y la capa oculta. Para la configuración de 4 neuronas en la capa de entrada (B1-B4), se observa un decrecimiento constante hasta la quinta neurona; a partir de esta, su EMC no disminuye significativamente y llega a un mínimo de 0,0378 con 12 neuronas en la capa oculta. En cuanto la configuración con 4 (NDVI, brillo, verdor y humedad) y 8 (B1-B4, NDVI y brillo, verdor y humedad) neuronas en la capa de entrada, se observa que el comportamiento es semejante, ya que los valores de EMC presentan casi el mismo decrecimiento con cada una de las neuronas en la capa oculta. Sin embargo, la configuración con 8 neuronas en la capa de entrada presenta el EMC más bajo, cuyo valor es 0,0339; a partir de este los decrecimientos no son significativos.

Lo anterior indica que los 8 componentes en la capa de entrada, además de presentar el EMC más bajo de los tres posibles conjuntos de entrada, brinda a la red la información complementaria y significativa para mejorar la clasificación e identificar





**Figura 2.** Comportamiento del EMC respecto al número de neuronas en la capa de entrada y la capa oculta  
Fuente: elaboración propia.



a) Imagen original en color verdadero

las nubes de manera eficiente. Por tanto se define que la configuración más adecuada para la detección de nubes corresponde a 8 neuronas en la capa de entrada, 7 neuronas en la capa oculta y 2 neuronas en la de salida.

**Figura 3.** Comparación entre la imagen original y los métodos de clasificación empleados  
Fuente: elaboración propia.



b) Máscara a partir de umbrales



c) Máscara a partir de la red neuronal

### **Análisis visual entre la red neuronal y el método de umbrales**

Para establecer la precisión de los resultados obtenidos se realizó un análisis entre la imagen original, la red neuronal MLP y el método de umbrales desarrollados en estudios anteriores. La figura 3 presenta los resultados para cada caso.

En la figura 3 se observa que las tres máscaras presentan un comportamiento similar en la identificación de las nubes. No obstante, el método que presentó mayor dificultad fue el de umbrales (figura 3b), ya que evidencia cierto ruido entre la nube, la zona urbana y en los cuerpos de agua, sobrestimando la presencia de nubes en el sector y, por tanto, las sombras asociadas a ellas. Por su parte, el método de RNA (figura 3c) discriminó la mayor parte de las nubes presentes de la zona. Con la claridad, el método de umbrales presentó dificultades en los contornos de las nubes, mientras que el RNA fue mucho más preciso. La máscara de umbrales no delimita la zona urbana, considerando nubes sobre esta superficie, cuando en realidad estas coberturas se encuentran libres de nubes, tal como se aprecia en la figura 3a.

### **Índices globales respecto a datos muestreados**

Se realizó un muestreo sobre cada imagen, en el cual se hizo una verificación

visual para cada pixel, evaluando la presencia o ausencia de nubes. Con el muestreo se obtuvieron 3383 pixeles sin nubosidad y 4517 con nubosidad.

La tabla 3 muestra la matriz de confusión obtenida para las máscaras de RNA y el método de umbrales respectivamente. Se observa que el método que presentó menor sobrestimación es el de RNA con 13 pixeles, mientras que el que pasó por alto la mayor cantidad de pixeles con nubes fue el de umbrales con 940 pixeles y el que presentó menor confusión fue el de RNA con 125 pixeles.

**Tabla 3.** Matriz de confusión para los datos muestreados de la máscara de RNA y de IBCM

	RNA		Umbrales	
	No nube	Nube	No nube	Nube
No nube	3370	13	3319	64
Nube	125	4392	940	3577

La tabla 4 muestra el error global de clasificación y los errores de omisión para los dos métodos a partir de las matrices de confusión. El método que presentó el menor error global fue el de RNA, con un 1,75%. Se observa que el RNA presentó los menores errores de omisión y comisión para ambas clasificaciones (nube y no nube). Por otro lado, se observa que el método de umbrales presentó errores de omisión en pixeles libres del 22,07% y comisión de pixeles nubosos del 20,81%.

**Tabla 4.** Error global de clasificación, errores de omisión y comisión y coeficiente kappa para los tres métodos

Método	Error global (%)	Comisión libre (%)	Omisión libre (%)	Comisión nube (%)	Omisión nube (%)
RNA	1,75	0,38	3,58	2,77	0,30
Umbrales	12,71	1,89	22,07	20,81	1,76





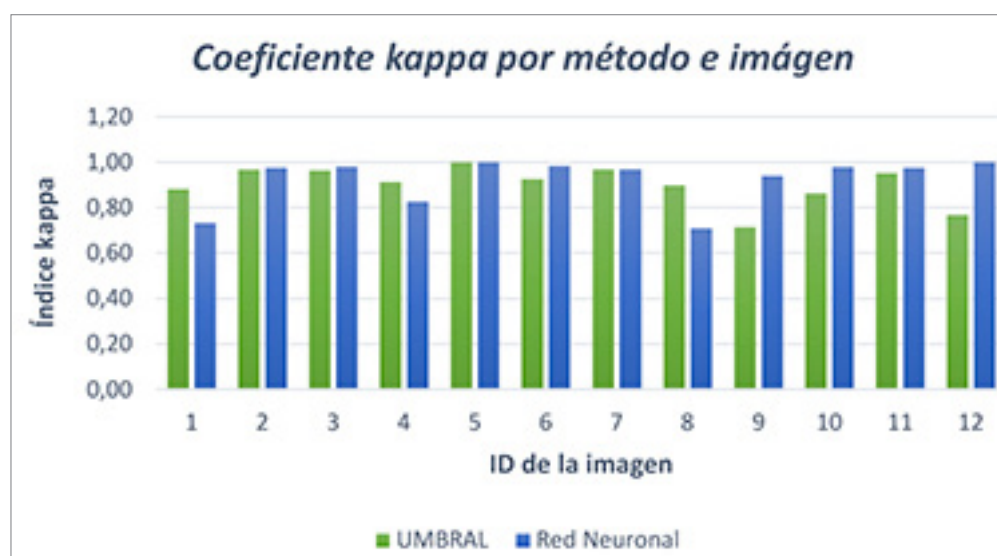
### Cálculo de coeficiente kappa

Como segundo método de comparación, se utilizó el coeficiente kappa para expresar los resultados estadísticamente. El coeficiente kappa asigna valores entre -1 y +1: mientras más cercano a 1, el grado de precisión es mayor; por el contrario, mientras más cercano a -1, mayor es

el grado de discordancia interobservador. Un valor de  $\kappa = 0$  refleja que la concordancia observada es precisamente la que se espera. La tabla 5 presenta los valores de coeficiente kappa obtenidos en la clasificación para el total de imágenes empleadas en el estudio, a partir del muestreo realizado para la validación.

**Tabla 5.** Comparación de redes y métodos de clasificación con coeficiente kappa

ID	Imagen	Número de muestras	Umbral	RN	Mejor método
1	LE70080562000099	200	0,88	0,73	Umbral
2	LE70080562000147	263	0,97	0,98	RN
3	LE70080562000227	219	0,96	0,98	RN
4	LE70080562000275	208	0,91	0,83	Umbral
5	LE70080562001021	171	1,00	1,00	Ambos
6	LE70080562001053	149	0,93	0,98	RN
7	LE70080562001069	200	0,97	0,97	RN
8	LE70080562001101	200	0,90	0,71	Umbral
9	LE70080562001213	202	0,72	0,94	RN
10	LE70080562001309	207	0,86	0,98	RN
11	LE70080562001357	172	0,95	0,98	RN
12	LE70080562002152	170	0,77	1,00	RN



**Figura 4.** Comparación entre métodos de clasificación empleando el coeficiente kappa

Fuente: elaboración propia.

En cuanto a la concordancia con los datos muestreados, los resultados fueron de 0,96 y 0,75 para RNA y umbrales respectivamente. De acuerdo con Landis y Koch (1977), quienes establecen la valoración del coeficiente kappa, se dice que la concordancia es muy buena para RNA y buena para el método de umbrales. Con lo anterior podemos afirmar que el número de muestras para entrenar la red es indiferente.

## Discusión

Con respecto a la precisión, Taravat *et al.* (2015) realiza una evaluación de la precisión de clasificación de la RNA MLP con una exactitud global promedio del 88,96% y unos errores de omisión y comisión del 11,04% y 3,88% respectivamente. En el caso del método propuesto en este proyecto, la exactitud global para RNA fue del 91%, un error de omisión del 0,30% y de comisión del 2,77%. No obstante, estos indicadores no permiten la determinación de la precisión del método en la totalidad de las imágenes porque fueron extraídos a partir de un muestreo de píxeles.

Pese a que diferentes autores implementan el índice de vegetación junto con el tasseled cap en una capa de entrada de la red por separado, en el desarrollo de este método se demostró que la combinación de ellos, junto con las bandas visibles e infrarrojo cercano, clasifica satisfactoriamente todas las variables planteadas, puesto que el NDVI, junto con el componente de verdor del tasseled, discriminó las diferentes coberturas de la zona, y los componentes de brillo y humedad del tasseled realizaron un aporte importante en la detección de nubes junto con las demás bandas.

Al comparar estos resultados con los obtenidos en estudios como el de Torres *et al.* (2003), que establecen diferentes números de neuronas para los tipos de nubes (cirros, cúmulos y extracúmulos), en esta metodología se estableció solo una capa oculta con 7 neuronas para todas las imágenes en general, lo que posiblemente generalizaría y además limitaría la precisión del método al caracterizar diferentes clases de nubes.

Diferentes autores evitan el uso del NDVI y el tasseled cap como elementos para caracterizar las nubes, puesto que generan confusión al detectar las sombras usando el método de umbrales, y además solo se obtiene una precisión global no mayor al 0,9% de tolerancia. Mientras tanto, el método de redes neuronales es más robusto y permisivo a cualquier variable o elemento que se desee integrar y alcanza precisiones mejores, siempre y cuando el número de neuronas que conforman la red sea adecuado.

## Conclusiones

El proceso permitió clasificar los elementos de nubes para un total de 7 neuronas en la capa oculta y con menos de cien iteraciones para cada una de las imágenes empleadas en el estudio y un EMC del 0,0339, lo que indica que el método es muy robusto y eficiente para este tipo de tareas y alcanza una exactitud global del 91% comparado con el método de umbrales desarrollado en estudios anteriores, cuya exactitud fue de 87,37%.

Definir las variables de entrada que comprendería la red es un proceso dispendioso que implica mucho tiempo, pero, a pesar de ello, se obtuvo un modelo muy acorde con la realidad, que permitió



conocer de manera exacta y precisa todas las variables que fueron consideradas para el desarrollo del proyecto con ayuda del coeficiente kappa.

El algoritmo de enmascaramiento para la nube con redes neuronales muestra un buen desempeño en la detección de nubes al combinar los tres componentes tasseled cap normalizados, más la información derivada de las bandas espectrales del satélite Landsat y el índice de vegetación.

El número de iteraciones de la red está ligado al límite de error permitido por el

operador, es decir, a la exactitud o precisión que se quiera obtener en los resultados.

Es importante destacar que la determinación de un número apropiado de neuronas ocultas en un sistema de red neuronal eficaz es bastante difícil. Un número insuficiente de neuronas en la capa oculta puede no representar la relación no lineal entre las variables de entrada y reducir la velocidad de convergencia. Por otra parte, el excedente de neuronas en la capa oculta puede generar cálculos inútiles en el proceso de aprendizaje.



## Bibliografía

- Behling, R., Bochow, M., Förster, S., Roessner, S. & Kaufmann, H. (2015). Automated GIS-based derivation of urban ecological indicators using hyperspectral remote sensing and height information. *Ecological Indicators*, 48, 218-234. <http://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.08.003>.
- Besogain Olabe, X. (2008). *Redes neuronales artificiales y sus aplicaciones* (libro del curso). Disponible en: [https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/9047/mod\\_resource/content/1/redes\\_neuro/contenidos/pdf/libro-del-curso.pdf](https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/9047/mod_resource/content/1/redes_neuro/contenidos/pdf/libro-del-curso.pdf).
- Davis, A. B., Brumby, S. P., Harvey, N. R., Lewis, H. K. & Rohde, C. A. (2001). Genetic refinement of cloud-masking algorithms for the multi-spectral thermal imager (MTI). *Proc. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2001 IEEE International Symposium*, Sydney, Australia, 9-13 July.
- Caicedo Bravo, E. & López Sotelo, J. (2009). *Una aproximación práctica a las redes neuronales artificiales*. Cali: Programa Editorial Universidad del Valle.
- Fisher, G. & Danaher, T. (2011). Automating woody vegetation change detection at regional scales: The problem of clouds and cloud shadows. *34th International Symposium on Remote Sensing of Environment*, Sydney, Australia, 10-15 April. Recuperado de <http://www.isprs.org/proceedings/2011/ISRSE-34/211104015Final00271.pdf>.
- Flórez López, R. & Fernández Fernández, J. (2008). *Las redes neuronales artificiales: fundamentos teóricos y aplicaciones prácticas*. La Coruña: Netbiblo.
- Gitelson, A., Peng, Y. & Huemmrich, K. F. (2014). Relationship between fraction of radiation absorbed by photosynthesizing maize and soybean canopies and NDVI from remotely sensed data taken at close range and from MODIS 250m resolution data. *Remote Sensing of Environment*, 147, 108-120. doi: 10.1016/j.rse.2014.02.014.
- Hagolle, O., Huc, M., Villa Pascual, D. & Dedieu, G. (2010). A multi-temporal method for cloud detection, applied to Formosat-2, Venus, Landsat and Sentinel-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 114(8), 1747-1755. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2010.03.002>.
- Hmimina, G., Dufrêne, E., Pontailier, J. Y., Delpierre, N., Aubinet, M., Caquet, B., De Grandcourt, A. et al. (2013). Evaluation of the potential of MODIS satellite data to predict vegetation phenology in different biomes: an inves-







- tigation using ground-based NDVI measurements. *Remote Sensing of Environment*, 132, 145-158. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.010>.
- Landis, J. & Koch, G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics*, 33(1), 159-174.
- Lee, J., Weger, R. C., Sengupta, S. K. & Welch, R. M. (1990). A neural network approach to cloud classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 28(5), 846-856. doi: 10.1109/36.58972.
- Lewis, H. G., Cote, S. & Tatnall, A. R. L. (1995). A neural network approach to cloud classification from multi-temporal satellite imagery. In *Fourth International Conference on Artificial Neural Networks* (pp. 116-121), Piscataway, USA, Institute of Electrical and Electronics Engineers. doi: 10.1049/cp:19950539.
- Li, D. & Tang, P. (2013). A sensor-based scheme for assessing cloud coverage in HJ-1 CCD data. In *Proc. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2013 IEEE International Symposium*. doi: 10.1109/IGARSS.2013.6721218.
- Li, D., Tang, P., Ge, Y. & Yang, J. (2012). An adaptive and automated method for masking cloud on Landsat data. *Proc. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2012 IEEE International Symposium*. doi: 10.1109/IGARSS.2012.6352687.
- Panem, Ch., Baillarin, S., Latry, C., Vadon, H. & Dejean, P. (2005). Automatic cloud detection on high resolution images. In *Proc. Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2005 IEEE International Symposium*. doi: 10.1109/IGARSS.2005.1526222.
- Qi, Y., Li, F., Liu, Z. & Jin, G. (2014). Impact of understorey on overstorey leaf area index estimation from optical remote sensing in five forest types in northeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 198-199, 72-80. doi: 10.1016/j.agrformet.2014.08.001.
- Sano, E. E., Ferreira, L. G., Asner, G. P. & Steinke, E. T. (2007). Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud-free Landsat images over the Bra-



- zilian tropical savanna. *International Journal of Remote Sensing*, 28(12), 2739-2752. <http://dx.doi.org/10.1080/01431160600981517>.
- Tapakis, R., & Charalambides, A. G. (2013). Equipment and methodologies for cloud detection and classification: A review. *Solar Energy*, 95, 392-430.
- Taravat, A., Proud, S., Peronaci, S., Del Frate, F. & Oppelt, N. (2015). Multilayer perceptron neural networks model for Meteosat second generation SEVIRI daytime cloud masking. *Remote Sensing*, 7(2), 1529-1539. doi:10.3390/rs70201529.
- Tian B., Azimi-Sadjadi, M. R., Vonder Haar, T. H. & Reinke, D. (1998). A temporal adaptive probability neural network for cloud classification from satellite imagery. 1998 *IEEE International Joint Conference on Neural Networks Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence*. doi: 10.1109/IJCNN.1998.687118.
- Torres Arriaza, J. A., Guindos Rojas, F., Peralta López, M. & Cantón, M. (2003). An automatic cloud-masking system using backpro neural nets for AVHRR scenes. In *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4), 826-831. doi: 10.1109/TGRS.2003.809930.
- Van der Meer, F. D., Van der Werff, H., Van Ruitenbeek, F., Hecker, C. A., Bakker, W. H., Noomen, M. F., Van der Meijde, M., Carranza, E. J., Boudewijn de Smeth, J. & Woldai, T. (2012). Multi-and Hyperspectral Geologic Remote Sensing: A Review. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 14(1), 112-128.
- Van Westen, C. J. (2013). Remote sensing and GIS for natural hazards assessment and disaster risk management. In: Shroder, J. y Bishop, M. P. (Eds.), *Treatise on Geomorphology* (vol. 3, Remote Sensing and GIScience in Geomorphology, pp. 259-298). San Diego, CA: Academic Press.
- Walder, P. & Maclaren, I. (2000). Neural network based methods for cloud classification on AVHRR images. *International Journal of Remote Sensing*, 21(8), 1693-1708. <http://dx.doi.org/10.1080/014311600209977>.
- Zhu, Z. & Woodcock, C. E. (2012). Object-based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 118, 83-94.





# PROGRAMA NACIONAL DE **LEVANTAMIENTO** DE SUELOS

INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI

TIPOS DE MUESTREO  
DE SUELOS



Barrenada



Cajuela



Calicata

## ¿QUÉ ES UN RECONOCIMIENTO SEMIDETALLADO DE SUELOS?

Es el proceso que permite presentar en un mapa, las clases de suelos e identificar las características físicas, químicas y mineralógicas de los suelos de una región, tiene por objeto determinar las potencialidades y limitantes de uso.

## ¿PARA QUÉ SIRVE EL RECONOCIMIENTO DE SUELOS?

- Para realizar recomendaciones en cuanto al manejo de cultivos y aplicación de fertilizantes.
  - Para conocer el estado de los suelos identificando problemas de erosión y áreas degradadas.
  - Para definir los sistemas productivos agropecuarios y forestales, ayudando a la formulación de proyectos productivos.
  - Para la planificación de los territorios de consejos comunitarios y resguardos indígenas.
  - Para la elaboración y actualización de los planes y esquemas de ordenamiento territorial.
  - Para la planificación y realización de planes de manejo y ordenación de cuencas, áreas de protección y proyectos ambientales en general.
- Para caracterizar los suelos de una región e identificar sus potencialidades y limitantes mediante un mapa.
  - Para conocer las características físicas, químicas y mineralógicas de los suelos.



# Evaluación del estado de crecimiento de la vegetación por medio de imágenes de radar y ópticas

## *Rating of vegetation growth state using radar and optical images*

David Montero Loaiza<sup>1</sup>, Francisco Luis Hernández Torres<sup>2</sup>

“Cómo citar este artículo: Montero Loaiza, D. y Hernández Torres, F. (2017). Evaluación del estado de crecimiento de la vegetación por medio de imágenes de radar y ópticas. *Análisis Geográficos*, 52, 125-141.

### Resumen

El estado de crecimiento de la vegetación juega un papel importante en la capacidad que tienen todos los aspectos biológicos de una región para mantenerse diversos y productivos en su entorno. Para el estudio fueron utilizados 3 tipos de imágenes satelitales para evaluar el estado de crecimiento de la vegetación en el Parque Nacional Soberanía en Panamá. Una imagen TerraSAR-X en polarización HV y con un ángulo de incidencia de 29° fue filtrada por 15 filtros diferentes en orden de reducir el moteado y después cada uno de los resultados fue valorado usando los evaluadores de *noise mean value* (NMV), *noise variance* (NV), *mean square difference* (MSD) y *equivalent number of looks* (ENL) y, de acuerdo con los criterios establecidos para estos evaluadores, fue elegido el mejor resultado de los filtros usados para obtener subsecuentemente el coeficiente de retrodispersión ( $\sigma^0$ ) de la imagen. Una imagen Landsat 8 fue utilizada de igual manera para obtener el *normalized difference vegetation index* (NDVI) y el *enhanced vegetation index* (EVI), que miden el estado de la vegetación, para ser correlacionados con el coeficiente de retrodispersión y obtener una regresión exponencial en función de dichas variables. Se obtuvieron, por lo tanto, dos funciones exponenciales, donde los resultados fueron un  $NDVI_{TSX}$  y un  $EVI_{TSX}$  a partir del coeficiente de retrodispersión y que fueron las variables representativas del estado de crecimiento de la vegetación en toda la zona de estudio. La correlación entre estas variables fue baja ( $R^2 = 0,447$  y  $R^2 = 0,424$  para el NDVI y el EVI respectivamente), haciendo que la validación de resultados con los productos NDVI y EVI de una imagen MODIS fuera, de igual manera, baja.

**Palabras clave:** TerraSAR-X, Landsat 8, coeficiente de retrodispersión, NDVI, EVI.

<sup>1</sup> Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo: dml.mont@hotmail.com.

<sup>2</sup> Universidad del Valle, Cali, Colombia. Correo: francisco.hernandez@correounivalle.edu.co.





## Abstract

*The state of vegetation growth plays an important role in the ability of all biological aspects of a region to remain diverse and productive in their environment. There were used 3 types of satellite imagery to assess the state of vegetation growth in the Soberanía National Park in Panama. A TerraSAR-X image in polarization HV and an incidence angle of 29° was filtered by 15 different filters in order to reduce speckle and then each of the results was evaluated using assessors Noise Mean Value (NMV), Noise Variance (NV), Mean Square Difference (MSD) and Equivalent Number of Looks (ENL); and according to the criteria established for these evaluators was elected the best result of the filters used to subsequently obtain the backscattering coefficient ( $\sigma^0$ ) of the image. A Landsat 8 image was used equally for the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and the Enhanced Vegetation Index (EVI), which measure the state of the vegetation, to be correlated with the backscattering coefficient and get an exponential regression depending on such variables. There were obtained therefore two exponential functions where the results were  $NDVI_{TSX}$  and  $EVI_{TSX}$  from the backscattering coefficient and were the representative variables of the state of vegetation growth throughout the study area. The correlation between these variables was low ( $R^2 = 0.447$  and  $R^2 = 0.424$  for NDVI and EVI respectively), making validation of results with the NDVI and EVI products from MODIS similarly low.*

**Keywords:** TerraSAR-X, Landsat 8, backscattering coefficient, NDVI, EVI.

## Introducción

**E**n una región, la sostenibilidad ambiental es definida como la capacidad que tiene cada uno de los aspectos biológicos para mantenerse productivo y diverso a lo largo del tiempo en un entorno dado. El estado de crecimiento de la vegetación constituye así un factor esencial en la sostenibilidad ambiental, determinando el estado en el que la vegetación crece y cómo se comporta respecto al contexto afectante en una zona específica.

Para monitorear el estado de crecimiento de la vegetación se han utilizado distintas metodologías que envuelven distintas herramientas, como la toma de datos in situ y el uso de imágenes aéreas o de imágenes ópticas. Sin embargo, nuevas metodologías son empleadas en la actualidad, como las imágenes de radar, que permiten una observación clara del territorio sin interferencias nubosas.

Baghdadi *et al.* (2009) evaluaron diferentes parámetros de los sensores de radar TerraSAR-X, ASAR/Envisat y PALSAR/ALOS, con el fin de determinar la mejor configuración para monitorear óptimamente el estado de crecimiento de cultivos de caña de azúcar. Los parámetros evaluados fueron la longitud de onda, la polarización y el ángulo de incidencia. A las imágenes se les calculó igualmente el coeficiente de retrodispersión, y les fue corregido el moteado. Como datos de apoyo se utilizaron el NDVI de imágenes SPOT, así como datos in situ para correlacionar los parámetros de radar. En este ejercicio las imágenes TerraSAR-X obtuvieron la mejor calificación, lo cual coincide con los resultados obtenidos por Baghdadi *et al.* (2010) en un

estudio sobre la capacidad de TerraSAR-X para monitorear el cultivo de caña, donde un ángulo de incidencia grande ( $53^\circ$ ) fue la mejor opción para determinar su estado de crecimiento. El coeficiente de retrodispersión y el NDVI aumentaron con el crecimiento de la caña, hasta llegar a nivelarse y finalmente descendieron con la cosecha. Con PALSAR/ALOS y ASAR/Envisat, la señal de radar tuvo fluctuaciones similares a TerraSAR-X; sin embargo la dinámica fue mucho menor, y se observaron casos donde a partir de una determinada altura del cultivo, el coeficiente de retrodispersión se mantuvo constante o decreció, disminuyendo ampliamente la correlación de estos con el estado de crecimiento del cultivo.

Lucas *et al.* (2014) utilizaron distintos rangos del coeficiente de retrodispersión en las polarizaciones HH y HV de la banda L en ALOS/PALSAR así como datos de cobertura proyectiva de follaje (FPC) para clasificar el estado de crecimiento y degradación de bosques. Para esto, crearon las clases: *bosques maduros*, *área sin bosque*, *bosques jóvenes* y *bosques intermedios*. En la evaluación de la clasificación se obtuvo una precisión del 77,8% del total clasificado, siendo la banda L una buena elección para el monitoreo de bosques, como lo hicieron Mitchell *et al.* (2014), que utilizaron imágenes Radarsat-2 y determinaron la capacidad de la banda C para extraer la cobertura de bosques y rellenar así los huecos creados por PALSAR/ALOS desde su falta de datos en el 2011. Las imágenes fueron clasificadas en dos clases (*bosque* y *no bosque*) y se evaluaron respecto a la misma clasificación realizada con ALOS/PALSAR, que tuvo una mayor precisión en cuanto a las áreas boscosas en la zona de estudio, ya que su



penetración en estas permite una buena observación de su comportamiento.

Minchella *et al.* (2009) y Tanase *et al.* (2011) evaluaron el potencial de ERS-SAR, TerraSAR-X, ASAR/Envisat y PALSAR/ALOS a la hora de monitorear la recuperación de la vegetación después de un incendio. Las imágenes ERS-SAR mostraron una gran utilidad para valorar el crecimiento de la vegetación, pero no permiten una buena diferenciación entre áreas quemadas y áreas de suelo desnudo. ASAR/Envisat tuvo una buena dinámica para determinar el estado de crecimiento en recuperación, mejor que la que se logró precisar con las imágenes TerraSAR-X, pero no mayor que la obtenida con ALOS/PALSAR, siendo la banda L una buena opción para observar la dinámica de recuperación de la vegetación y para diferenciar las fases de su crecimiento.

Jiao *et al.* (2014) evaluaron la precisión de una clasificación orientada a objetos con el fin de monitorear cultivos con Radarsat-2 y obtuvieron precisiones del 95% y 96%. Adicionalmente, y respecto a los valores de entropía, encontraron que esta tiene una buena correlación con el estado de crecimiento de la vegetación y que, al igual que el coeficiente de retrodispersión, aumenta con el crecimiento, llega a un pico y desciende con la cosecha.

Capodici, D'Urso y Maltese (2013), Sonobe *et al.* (2014) y El Hajj *et al.* (2014) evaluaron el potencial de la banda X por TerraSAR-X y COSMO-SkyMed para monitorear la vegetación. Hallaron una alta correlación entre el coeficiente de retrodispersión y el estado de crecimiento de la vegetación, así como con los índices de

vegetación de imágenes ópticas. Del primer estudio se obtuvo una fórmula general de recuperación de los índices de vegetación, los cuales pueden ser obtenidos a partir de una función exponencial del coeficiente de retrodispersión.

Con fundamento en los resultados obtenidos de los estudios previamente mencionados, para el presente proyecto se propuso el uso de imágenes de radar en la banda X con TerraSAR-X, ya que su interacción con la vegetación permite un buen monitoreo de su estado de crecimiento. De esta manera se lograría obtener un NDVI y un EVI recuperados del coeficiente de retrodispersión, y estos actuarían como los valores representativos del estado de crecimiento de la vegetación en la zona de estudio.

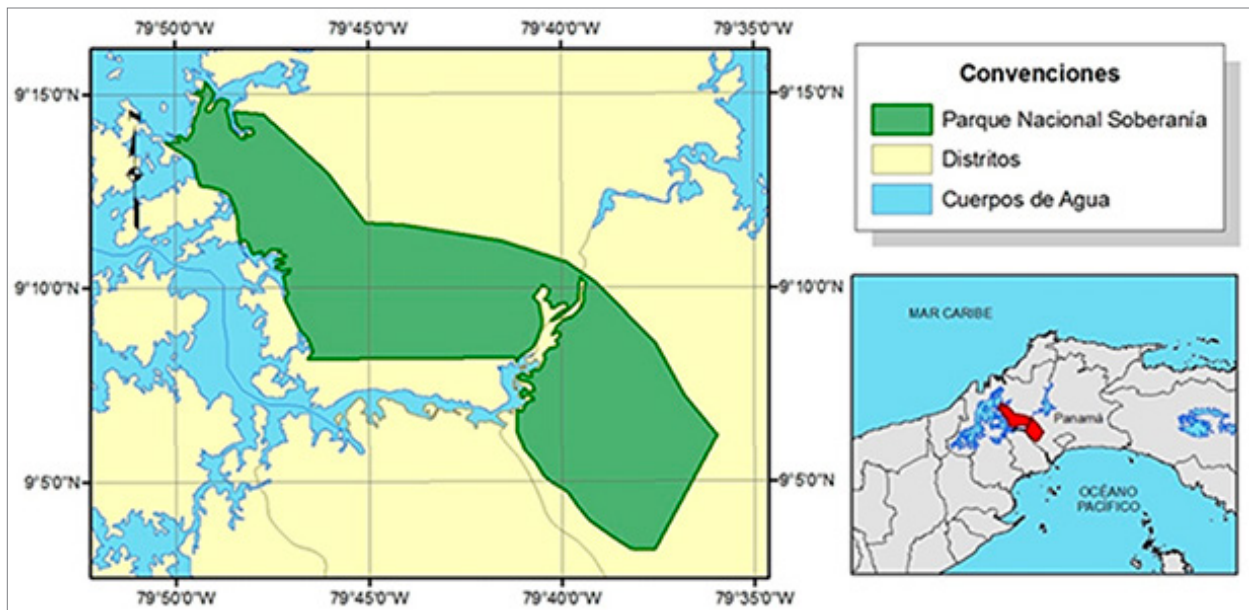
## **Materiales y métodos**

### ***Zona de estudio***

La zona de estudio es el Parque Nacional Soberanía, en Panamá (figura 1). El parque se sitúa a lo largo de la ribera este del Canal de Panamá y ocupa parte de las provincias de Panamá y Colón. Es una de las áreas protegidas del país, su extensión es de 19 525 ha, cuenta con bosques tropicales húmedos y constituye el hábitat de más de 1300 especies de plantas y más de 700 especies de animales.

### ***Datos de imágenes de radar***

Una imagen del sensor TerraSAR-X (figura 2) en polarización HV con fecha de toma del 12 de julio del 2013 y un ángulo de incidencia de 29° se usó para la realización del proyecto.



**Figura 1.** Cartografía del Parque Nacional Soberanía en Panamá  
Fuente: elaboración propia.

Dicha imagen fue llevada a un proceso de reducción del moteado a través de diferentes filtros siguiendo la metodología propuesta por Joshi y Garg (2012), en donde se aplican los filtros gamma, Lee sigma, Frost, media y mediana a ventanas de 3 x 3, 5 x 5 y 7 x 7, de los cuales se eligió la mejor configuración para reducir

el moteado. En dicho orden, se aplicaron 4 parámetros de evaluación de reducción del moteado para los filtros aplicados: noise mean value (NMV) (ec. 1), noise variance (NV) (ec. 2), mean square difference (MSD) (ec. 3) y equivalent numbers of looks (ENL) (ec. 4):



**Figura 2.** Imagen TerraSAR-X del canal de Panamá, tomada en modo WideScanSAR, órbita descendente, polarización HV a un ángulo de incidencia de 29° el 12 de julio de 2013

Fuente: elaboración propia.

$$NMV = \frac{\sum_{r,c} I_d(r,c)}{R * C} \quad (1)$$

$$NV = \frac{\sum_{r,c} (I_d(r,c) - NMV)^2}{R * C} \quad (2)$$

$$MSD = \frac{\sum_{r,c} (I_s(r,c) - I_d(r,c))^2}{R * C} \quad (3)$$

$$ENL = \frac{NMV^2}{NV} \quad (4)$$





Donde  $I_d(r, c)$  es la imagen corregida en el moteado,  $I_s(r, c)$  es la imagen sin corregir, R es el número de filas de la imagen y C es el número de columnas de la imagen. El parámetro NMV determina la cantidad de ruido en la imagen corregida: a menor valor obtenido, menor será el ruido de la imagen. El NV determina el contenido de moteado en la imagen, por lo tanto, un valor bajo representa un menor moteado. El MSD indica la diferencia media entre los píxeles en la imagen sin corregir y la imagen corregida, por lo tanto, a un mayor valor, la imagen tendrá un mejor resultado. El ENL corresponde al rendimiento del filtro aplicado, por lo tanto, un mayor valor obtenido representa un mayor rendimiento. Llevando a cabo esta evaluación es posible determinar el mejor filtro entre los aplicados, y la imagen resultante continuará con el proceso en el proyecto.

El coeficiente de retrodispersión ha demostrado tener una gran correlación con el estado de crecimiento de la vegetación, aumentando su nivel a medida que la vegetación crece (Baghdadi *et al.*, 2009). Por lo tanto, se efectuó la calibración radiométrica

para obtener el coeficiente de retrodispersión de la imagen a la cual le fue corregido y reducido el moteado (ec. 5).

$$\sigma_i^o (dB) = 20 \log_{10} DN_i + 10 \log_{10} (CalFact) + 10 \log_{10} (\sin \theta_i) \quad (5)$$

Donde:

$\sigma_i^o$  (dB) = coeficiente de retrodispersión en decibeles,

$DN_i$  = números digitales de la imagen corregida,

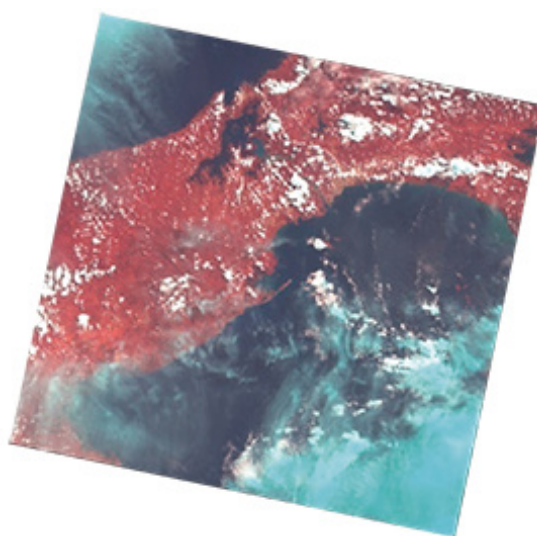
**CalFact** = valor escalar de ganancia correspondiente a las imágenes de Terra-SAR-X, que varía entre  $10^{-6}$  y  $10^{-4}$  y

$\theta$  = ángulo de incidencia de la imagen de radar.

### Datos de imágenes ópticas

Se utilizó una imagen satelital Landsat 8 OLI (figura 3) del path and row 12-54, con fecha de toma del 3 de junio de 2013, por su cercanía a la fecha de toma de la imagen de radar y su poca cobertura nubosa, aunque su porcentaje aún es alto.

**Figura 3.** Imagen Landsat 8 OLI compilada tomada el 3 de junio de 2013  
Fuente: Landsat.



A esta imagen se le realizó una corrección atmosférica con el fin de eliminar el ruido generado por la atmosfera al paso de la señal al satélite, que produce errores en la localización, así como en los números digitales (ND) de los pixeles. En este paso se calculó a la reflectancia (Brizuela, Aguirre & Velasco, 2007).

Los valores que tienen los pixeles son conocidos como *números digitales*. Para pasar de estos valores de la imagen en Landsat 8 a valores de reflectancia se realizaron correcciones por multiplicativos de reflectancia, aditivos de reflectancia y por ángulo solar:

$$P\lambda = \frac{Mp * Qcal + Ap}{\sin(\theta se)} \quad (6)$$

Donde  $P\lambda$  es la reflectancia de la imagen de Landsat 8,  $Mp$  es el factor multiplicativo de escalado específico por banda que es encontrado en el metadato de la imagen,  $Qcal$  son los valores digitales de la imagen o los ND,  $Ap$  es el factor aditivo de escalado específico por banda que es encontrado en el metadato de la imagen y  $\theta se$  es el ángulo de elevación solar.

El NDVI es un índice utilizado ampliamente alrededor del mundo para medir el estado de la vegetación ya que se ha probado que tiene una alta relación con su estado de crecimiento, y aumenta sus valores cuando la vegetación crece (Baghdadi *et al.*, 2009). Por lo tanto, se calculó este índice para que sirviera de apoyo a las imágenes de radar en la evaluación del estado de crecimiento de la vegetación. La fórmula para el cálculo del NDVI es:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R} \quad (7)$$

Donde:

**NIR** es la reflectancia de la banda 5 (infrarrojo cercano en Landsat 8) y

**R** es la reflectancia de la banda 4 (rojo en Landsat 8).

El EVI es un índice optimizado diseñado para mejorar la señal de la vegetación en regiones con alta biomasa. Mientras el NDVI es más sensible a la clorofila, el EVI genera una respuesta mayor en cuanto a las variaciones estructurales del dosel. La fórmula para el cálculo del EVI es:

$$EVI = G * \frac{NIR - R}{NIR + (C1 * R) - (C2 * B) + L} \quad (8)$$

Donde:

**B** es la reflectancia de la banda 2 (azul en Landsat 8),

**C1 y C2** son los coeficientes del término de resistencia del aerosol,

**L** es el ajuste de fondo del dosel y

**G** es un factor de ganancia.

Se adoptaron los valores de  $C1 = 6$ ;  $C2 = 7,5$ ;  $L = 1$  y  $G = 2,5$ , que son los valores usados en el algoritmo del EVI por el espectrorradiómetro de imágenes de media resolución (MODIS, por la sigla en inglés de *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*) para posteriormente realizar la validación de resultados con este producto.



## Evaluación del estado de crecimiento de la vegetación

Para realizar la respectiva evaluación del estado de crecimiento de la vegetación se utilizaron los resultados obtenidos del coeficiente de retrodispersión a partir de las imágenes de radar, apoyados en los índices NDVI y EVI obtenidos de las imágenes satelitales. De los resultados obtenidos por Baghdadi *et al.* (2009), se ha confirmado que entre el coeficiente de retrodispersión obtenido por TerraSAR-X en polarización HH a un ángulo de incidencia de 53° y el índice NDVI obtenido de imágenes SPOT hay una correlación bastante alta, con un  $R^2 = 0,87$ ; y que tomando el índice NDVI como representante del estado de crecimiento de la vegetación se puede obtener el coeficiente de retrodispersión, por medio de una función logarítmica a partir del NDVI.

Por lo tanto, según Capodici, D'Urso & Maltese (2013), los índices de vegetación NDVI y EVI, respecto al estado de crecimiento de la vegetación, pueden representarse por medio de una función exponencial al ingresar en dicha función el coeficiente de retrodispersión:

$$NDVI_{TSX} = a_1 e^{a_2 \sigma^0} \quad (9)$$

$$EVI_{TSX} = a_3 e^{a_4 \sigma^0} \quad (10)$$

Los valores de los parámetros  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  y  $a_4$  se hallaron por medio de una regresión exponencial entre el coeficiente de retrodispersión obtenido de las imágenes de radar y los índices NDVI y EVI derivados de una muestra de las imágenes satelitales.  $NDVI_{TSX}$  corresponde al NDVI obtenido a partir de la ecuación 9 y  $EVI_{TSX}$  es el EVI derivado de la ecuación 10, y representan el estado de crecimiento de la vegetación de acuerdo al valor del coeficiente de retrodispersión  $\sigma^0$ . Posteriormente se aplicó la fórmula derivada de la regresión exponencial a la imagen de radar para obtener así la imagen resultante del estado de crecimiento de la vegetación en la zona de estudio.

## Validación de resultados

El resultado obtenido del estado de crecimiento de la vegetación fue validado con los productos NDVI y EVI de MODIS, los cuales fueron resampleados al tamaño de pixel correspondiente al de la imagen satelital, para posteriormente realizar una regresión lineal entre el estado de crecimiento de la vegetación derivado de las imágenes de radar y los índices NDVI y EVI de MODIS, para obtener de esa manera el coeficiente de correlación de Pearson de dichas regresiones.

## Resultados y discusión

A lo largo del proyecto se obtuvieron distintos resultados, entre ellos, el procesamiento de la imagen de radar y de la imagen óptica, así como la evaluación del estado de crecimiento de la vegetación y su posterior validación.

### Datos de imágenes de radar

A la imagen de radar le fue reducido el moteado para poder continuar con su procesamiento. Se aplicaron un total de 5 filtros (gamma, Lee sigma, Frost, media y mediana) en tres tamaños de ventana diferentes (3 x 3, 5 x 5 y 7 x 7) para identificar qué filtro era el más adecuado para reducir el moteado sin producir cambios severos en la imagen.

Se utilizaron, por lo tanto, 4 modelos para evaluar el potencial y rendimiento de cada uno de los 15 filtros aplicados (noise mean value, noise variance, mean square difference y equivalent numbers of looks), obteniendo así sus respectivos valores, que se muestran en la tabla 1.

Para hallar el filtro con mejor acople a la imagen de radar y con un mayor rendimiento, se tuvo en cuenta que para el NMV el menor resultado correspondería al mejor filtro, al igual que en el NV, al contrario de lo que sucede con el MSD y el ENL, que buscan el mayor resultado. El menor resultado en NMV lo obtuvo el filtro de mediana en ventana de 7 x 7 y en NV lo obtuvo Lee sigma en ventana de 7 x 7, mientras que en MSD y ENL el mayor resultado lo obtuvo el filtro de media en ventana de 7 x 7 (resaltado en la tabla 1). Este último fue el elegido para continuar el proceso, puesto que el ENL genera el rendimiento a partir del NMV y el NV y, al obtener este filtro, el mayor resultado en este evaluador más el mayor resultado en el MSD lo hace el filtro con mejor acople para la imagen de radar.

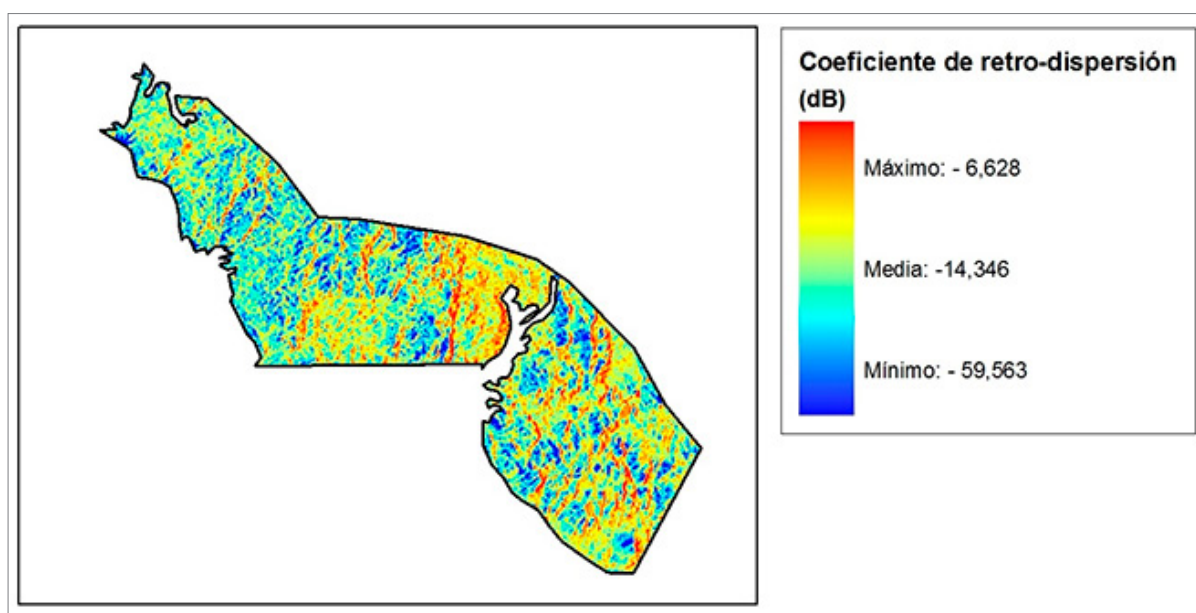
**Tabla 1.** Evaluación de filtros de reducción de moteado por NMV, NV, MSD y ENL

Filtro	NMV	NV	MSD	ENL
<i>Frost 3 x 3</i>	69,433	7010,990	41,984	0,688
<i>Frost 5 x 5</i>	69,471	6905,872	92,200	0,699
<i>Frost 7 x 7</i>	69,614	6853,094	139,670	0,707
<i>Gamma 3 x 3</i>	68,653	6850,485	109,588	0,688
<i>Gamma 5 x 5</i>	68,476	6598,918	379,287	0,711
<i>Gamma 7 x 7</i>	68,493	6426,532	603,670	0,730
<i>Lee sigma 3 x 3</i>	69,132	6902,883	106,759	0,692
<i>Lee sigma 5 x 5</i>	67,674	6469,204	321,062	0,708
<i>Lee sigma 7 x 7</i>	66,572	6164,675	481,631	0,719
<i>Media 3 x 3</i>	69,892	6874,795	122,510	0,711
<i>Media 5 x 5</i>	69,923	6540,800	432,832	0,748
<i>Media 7 x 7</i>	69,940	6340,473	698,397	0,771
<i>Mediana 3 x 3</i>	68,689	6940,616	117,226	0,680
<i>Mediana 5 x 5</i>	67,239	6565,356	417,457	0,689
<i>Mediana 7 x 7</i>	66,277	6334,896	695,225	0,693

Fuente: elaboración propia.







Joshi y Garg (2010) realizaron el mismo procedimiento de corrección del moteado y obtuvieron el mismo resultado en el evaluador NMV, donde el filtro de mediana 7 x 7 fue la mejor opción, mientras que en los evaluadores NV, MSD y ENL se obtuvieron los filtros de mediana 7 x 7 para el NV y el MSD, y el filtro gamma 7 x 7 para el ENL. Según sus resultados, los autores eligieron el filtro de mediana 7 x 7 para corregir la imagen, a diferencia del filtro de media 7 x 7 elegido en este proyecto, contando, sin embargo, con el mismo tamaño de ventana para la reducción del moteado.

Posteriormente, se reproyectó la imagen de radar con el filtro de media en una ventana de 7 x 7 al sistema de referencia de la imagen Landsat 8 (UTM WGS84 Zona 17 Norte) a un tamaño de pixel de 30 m y fue calculado el coeficiente de retrodispersión con la ecuación 5, obteniendo así el coeficiente en decibeles y recortando la imagen a la zona de estudio.

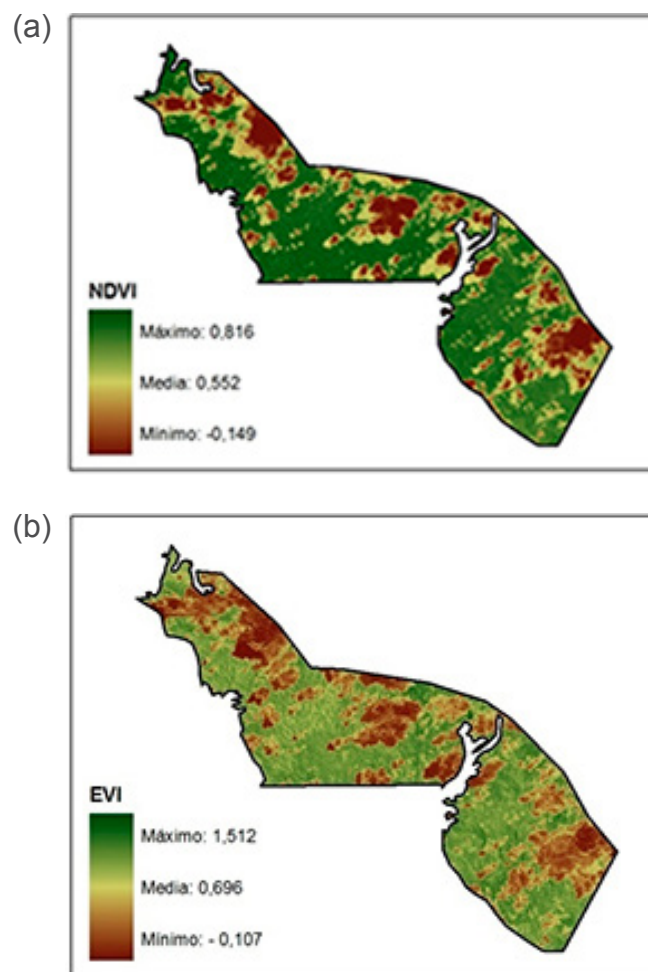
La ecuación utilizada para calcular el coeficiente de retrodispersión fue propuesta por Baghdadi *et al.* (2009) para la calibración

**Figura 4.** Coeficiente de retrodispersión en decibeles obtenido de la imagen cruda de TerraSAR-X para la zona de estudio  
*Fuente: elaboración propia.*

de imágenes de TerraSAR-X. Mediante su aplicación se obtuvo una dinámica de aproximadamente 50 decibeles en la zona de estudio, con una media de -14,346 dB, un mínimo de -59,563 dB y un máximo de -6,628 dB (figura 4).

### **Datos de imágenes ópticas**

Para la imagen óptica de Landsat 8 se compilaban todas las bandas (exceptuando las bandas térmicas y la pancromática) y se halló la reflectancia de la imagen compilada con la ecuación 6. Posteriormente, a partir de la reflectancia, se calculó el NDVI y el EVI de la imagen con las ecuaciones 7 y 8, índices usados ampliamente para el estudio del crecimiento de la vegetación (Baghdadi *et al.*, 2009, 2010; Minchella *et al.*, 2009; Tanase *et al.*, 2011; Capodici, D'Urso & Maltese, 2013; El Hajj *et al.*, 2014), y se recortaron ambos resultados a la zona de estudio.



**Figura 5.** a) NDVI obtenido de la imagen Landsat 8 para la zona de estudio; b) EVI obtenido de la imagen Landsat 8 para la zona de estudio  
Fuente: elaboración propia.

El NDVI (figura 5a) obtuvo una dinámica de aproximadamente 0,9 unidades, con una media de 0,552 y valores mínimo y máximo de -0,149 y 0,816 respectivamente. El EVI (figura 5b) alcanzó una dinámica de aproximadamente 1,6 unidades, con una media de 0,696 y valores mínimo y máximo de -0,107 y 1,512 respectivamente. Los valores negativos en ambos índices representan la presencia de nubes y posibles cuerpos de agua en la imagen, mientras que el valor máximo del EVI es presentado como un dato atípico en el rango obtenido.

Al analizar los correspondientes histogramas, se concluye que los resultados obtenidos demuestran que los índices NDVI y EVI confirman un estado de crecimiento de la vegetación relativamente bueno y homogéneo, tomando como referencia el rango de 0 a 1 de cada índice.

### ***Evaluación del estado de crecimiento de la vegetación***

Para realizar las regresiones entre el coeficiente de retrodispersión y los índices NDVI y EVI se seleccionó en la imagen

Landsat 8 un área de muestra que se encontrara libre de nubes. Se recortaron las imágenes para convertirlas a formato ASCII y mediante el uso de Excel se realizó la respectiva regresión exponencial entre las variables mencionadas. Fueron elegidos 30 píxeles aleatoriamente para realizar la regresión exponencial, tal como proponen Capodici, D'Urso & Maltese (2013), mediante la cual el comportamiento de un índice de vegetación puede ser explicado por medio de una función exponencial del coeficiente de retrodispersión, encontrando las siguientes relaciones:

De las regresiones exponenciales se extrajeron las funciones por las cuales pueden recuperarse el NDVI y el EVI a partir del coeficiente de retrodispersión (ecuación 9 y 10), expresadas en dos funciones exponenciales, con un coeficiente de correlación de 0,447 para el NDVI (figura 6a) y de 0,424 para el EVI (figura 6b). Estos coeficientes resultan bajos en

comparación con el obtenido por Capodici, D'Urso & Maltese (2013), con un  $R^2 = 0,750$  para el NDVI.

$$NDVI_{TSX} = 0,811e^{0,009\sigma^0} \quad (11)$$

$$EVI_{TSX} = 1,187e^{0,020\sigma^0} \quad (12)$$

Donde  $NDVI_{TSX}$  y  $EVI_{TSX}$  son el NDVI y el EVI obtenidos a partir del coeficiente de retrodispersión de TerraSAR-X, respectivamente, y representan el estado de crecimiento de la vegetación en la zona de estudio, y  $\sigma^0$  es el coeficiente de retrodispersión. Las ecuaciones (11 y 12) son, por lo tanto, aplicadas a la imagen del coeficiente de retrodispersión de la zona de estudio, obteniendo así el  $NDVI_{TSX}$  y el  $EVI_{TSX}$  del Parque Nacional Soberanía.

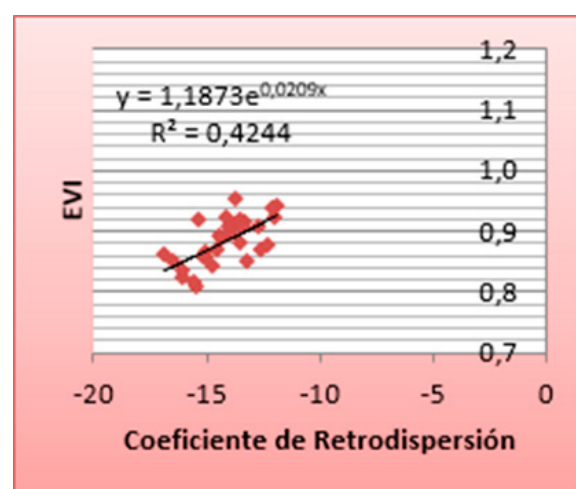
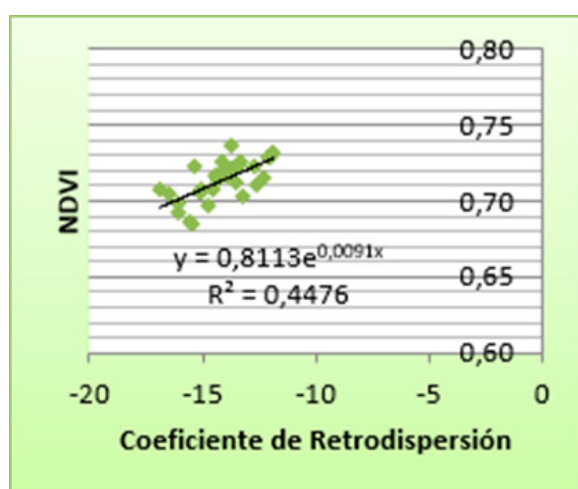


Figura 6. a) Relación entre el coeficiente de retrodispersión (dB) y el NDVI para los 30 puntos aleatorios de la muestra; b) relación entre el coeficiente de retrodispersión (dB) y el EVI para los 30 puntos aleatorios de la muestra

Fuente: elaboración propia.

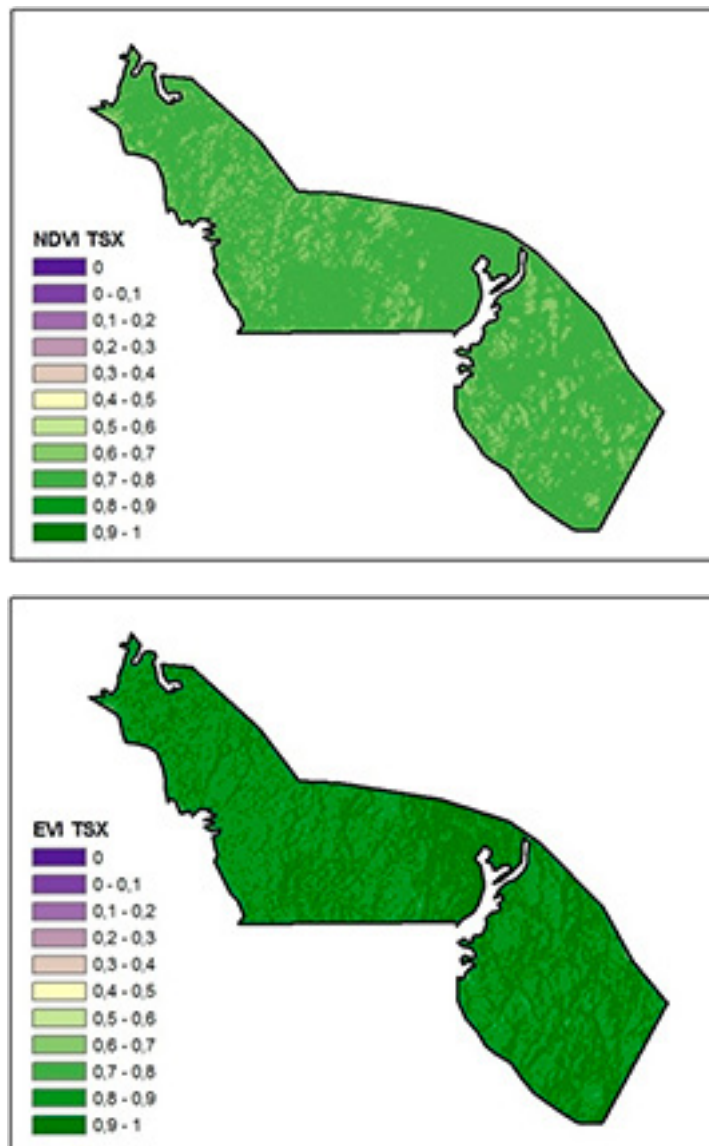


Figura 7. a)  $NDVI_{TSX}$  para la zona de estudio; b)  $EVI_{TSX}$  para la zona de estudio

Fuente: elaboración propia.

El  $NDVI_{TSX}$  (figura 7a) obtuvo una dinámica de aproximadamente 0,3 unidades, es decir, 0,6 unidades menos que el NDVI de la imagen Landsat. El  $NDVI_{TSX}$  tuvo una media de 0,713, un valor mínimo de 0,474 y máximo de 0,764. Por otro lado, el  $EVI_{TSX}$  (figura 7b) obtuvo una dinámica de aproximadamente 0,7 unidades, es decir, 0,9 unidades menos que el EVI de la imagen Landsat. El  $EVI_{TSX}$  tuvo una media de 0,892, un valor mínimo de 0,361 y máximo de 1,040.

### Validación de resultados

Se validaron los resultados del  $NDVI_{TSX}$  y del  $EVI_{TSX}$  con los productos NDVI y EVI de una imagen MODIS, con resolución de 250 m, descargada de la retícula de MODIS correspondiente a la fila y columna h10v8 y con fecha de toma del 12 de julio de 2013.

La imagen MODIS fue convertida a formato GeoTIFF con la ayuda del software SeaDAS 7.1 y referenciada al sistema de



referencia de la imagen Landsat 8 (UTM WGS84 Zona 17 Norte). Se resampleó la imagen a un tamaño de pixel de 30 m, se extrajeron los productos correspondientes a NDVI y EVI y se realizó el recorte de la zona de estudio.

Se realizó la correlación entre el  $NDVI_{TSX}$  y el NDVI producto de MODIS, obteniendo un coeficiente de correlación de -0,024, mientras que el coeficiente de correlación entre el  $EVI_{TSX}$  y el EVI producto de MODIS fue de 0,036. Esta validación obtuvo una correlación demasiado baja, lo cual significa que la correlación entre las variables analizadas es prácticamente nula, lo cual puede explicarse por distintos factores: el primero es la escala temporal, puesto que la imagen Landsat 8 fue adquirida un mes antes de las imágenes TerraSAR-X y MODIS. Un segundo factor es el ángulo de incidencia, que es bajo ( $29,2^\circ$ ) y, como expusieron Baghdadi *et al.* (2009, 2010), es efectivo cuando alcanza valores altos (superiores a  $50^\circ$ ). El tercer factor corresponde a las diferencias en la resolución espacial, distinta en las 3 imágenes (16 m, 30 m y 250 m).

## Conclusiones

El estado de crecimiento de la vegetación es un factor importante en la evaluación de la sostenibilidad ambiental de una región y puede ser evaluado por medio de imágenes ópticas e imágenes de radar, siempre y cuando se cumplan algunos requisitos esenciales para que esta sea efectiva.

Los filtros que se aplican sobre la imagen de radar para que pueda ser procesada posteriormente son necesarios a la hora de corregir el moteado de una imagen; sin embargo, estos deben ser evaluados,

ya que con algunos filtros se obtienen mejores correcciones mientras que con otros se puede perder información. Los métodos de evaluación del noise mean value (NMV), noise variance (NV), mean square difference (MSD) y equivalent number of looks (ENL) cumplen una función efectiva al momento de evaluar el rendimiento de un filtro aplicado sobre una imagen.

El coeficiente de retrodispersión y los índices de vegetación NDVI y EVI obtenidos de imágenes ópticas puede ser relacionado por medio de funciones exponenciales, sin embargo, dicha relación puede verse disminuida debido a la diferencia temporal, espacial y geométrica de las imágenes.

Esta relación entre el coeficiente de retrodispersión y los índices NDVI y EVI se hace necesaria para evaluar el estado de crecimiento de la vegetación, ya que a partir de estos índices, que representan el estado de crecimiento de la vegetación, pueden realizarse distintos análisis e interpretaciones respecto al tema. La función obtenida a partir de dicha relación puede ser efectiva, evitando así el problema de la interferencia nubosa en las imágenes ópticas, como puede comprobarse al analizar la reducción de la dinámica y el incremento de la media entre los índices obtenidos desde la imagen de radar y los alcanzados desde las imágenes ópticas. De esa manera se aprovecha la alta dinámica de la respuesta de las imágenes de radar para un mayor detalle en interpretaciones y análisis.

Fue comprobado que una alta escala temporal entre las imágenes (mayor a 30 días) disminuye notablemente la relación entre

las respuestas de las imágenes utilizadas. El bajo ángulo de incidencia ( $29,2^\circ$ ) del sensor SAR influyó en la baja correlación de las respuestas, puesto que, según Baghdadi *et al.* (2009), los ángulos de incidencia altos (por ejemplo, mayores a  $50^\circ$ ) generan una mayor efectividad para la relación entre el coeficiente de retrodispersión y los índices de vegetación.

La diferencia entre las resoluciones espaciales de las imágenes utilizadas generó, de igual manera, una correlación nula a la hora de la validación de los resultados obtenidos, puesto que MODIS genera un tamaño de pixel más grande (250 m) que los producidos por Landsat 8 y TerraSAR-X

(30 m y 16 m respectivamente) y crea una combinación de respuesta de varios objetos en la superficie terrestre, mientras que los pixeles de tamaño más bajo evitan combinaciones grandes y generan relaciones pobres entre los resultados.

Las características de las imágenes utilizadas juegan, por lo tanto, un papel importante, ya que las resoluciones temporales, espaciales y geométricas de estas son factores que inciden directamente en la relación de los resultados y en la efectividad de la respuesta de las imágenes de radar respecto a la evaluación del estado de crecimiento de la vegetación por medio de los índices empleados.





## Bibliografía

---

---

- Baghdadi, N., Boyer, N., Todoroff, P., El Hajj, M. & Bégué, A. (2009). Potential of SAR sensors TerraSAR-X, ASAR/Envisat and PALSAR/ALOS for monitoring sugarcane crops on Reunion Island. *Remote Sensing of Environment*, 113(8), 1724-1738. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2009.04.005>.
- Baghdadi, N., Cresson, R., Todoroff, P. & Moinet, S. (2010). Multitemporal Observations of Sugarcane by TerraSAR-X Images. *Sensors*, 10(10), 8899-8919. doi:10.3390/s101008899.
- Brizuela, A., Aguirre, C. & Velasco, I. (2007). Aplicación de métodos de corrección atmosférica de datos Landsat 5 para análisis multitemporal. En: *Teledetección: hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional* (pp. 207-214). Mar del Plata: Martin. Recuperado de <http://www.aet.org.es/congresos/xii/arg27.pdf>.
- Capodici, F., D'Urso, G. & Maltese, A. (2013). Investigating the Relationship between X-Band SAR Data from COSMO-SkyMed Satellite and NDVI for LAI Detection. *Remote Sensing*, 5(3), 1389-1404. doi:10.3390/rs5031389.
- El Hajj, M., Baghdadi, N., Belaud, G., Zribi, M., Cheviron, B., Courault, D. y otros (2014). Irrigated Grassland Monitoring Using a Time Series of TerraSAR-X and COSMO-SkyMed X-Band SAR Data. *Remote Sensing*, 6(10), 10002-10032. doi:10.3390/rs61010002.
- Jiao, X., Kovacs, J. M., Shang, J., McNairn, H., Walters, D., Ma, B. & Geng, X. (2014). Object-oriented crop mapping and monitoring using multi-temporal polarimetric Radarsat-2 data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 96, 38-46. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2014.06.014.
- Joshi, R., & Garg, R. D. (2012). Pre-processing of TerraSAR-X data for speckle removal: An approach for performance evaluation. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 40(3), 371-377. doi:10.1007/s12524-011-0168-1.
- Lucas, R., Clewley, D., Accad, A., Butler, D., Armston, J., Bowen, M. y otros (2014). Mapping forest growth and degradation stage in the Brigalow Belt Bioregion of Australia through integration of ALOS PALSAR and Landsat-derived foliage projective cover data. *Remote Sensing of Environment*, 155, 42-57. doi: 10.1016/j.rse.2013.11.025.



- Minchella, A., Del Frate, F., Capogna, F., Anselmi, S. & Manes, F. (2009). Use of multitemporal SAR data for monitoring vegetation recovery of Mediterranean burned areas. *Remote Sensing of Environment*, 113(3), 588-597. doi: 10.1016/j.rse.2008.11.004.
- Mitchell, A., Tapley, I., Milne, A., Williams, M., Zhou, Z.-S., Lehmann, E. y otros (2014). C- and L-band SAR interoperability: Filling the gaps in continuous forest cover mapping in Tasmania. *Remote Sensing of Environment*, 155, 58-68. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.020>.
- Sonobe, R., Tani, H., Wang, X., Kobayashi, N. & Shimamura, H. (2014). Winter Wheat Growth Monitoring Using Multi-temporal TerraSAR-X Dual-polarimetric Data. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 48(8), 471-476. Recuperado de <https://www.jircas.go.jp/lo/file/8959/download?token=Jmfg5puD>.
- Tanase, M., de la Riva, J., Santoro, M., Pérez-Cabello, F. & Kasischke, E. (2011). Sensitivity of SAR data to post-fire forest regrowth in Mediterranean and boreal forests. *Remote Sensing of Environment*, 115, 2075-2085. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2005.862266>.





# GEOGRÁFICO AGUSTÍN

## PRODUCTOS Y SERVICIOS CON CALIDAD

Para conocer nuestros  
productos y servicios consulte

[www.igac.gov.co](http://www.igac.gov.co)

Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC  
Oficina Sede Central en Bogotá  
Carrera 30 N° 48-51

Oficinas de atención a nivel nacional  
Conmutador: [571] 3694000 ó 3694100  
Línea de atención al cliente: 018000 915570

**IGAC**  
INSTITUTO GEOGRÁFICO  
AGUSTÍN CODAZZI



# Geodesia espacial en la gestión del riesgo: aplicaciones actuales y futuras en Colombia

## *Spatial geodesy in risk management: current and future applications in Colombia*

Héctor Mora-Páez<sup>1</sup>

“Cómo citar este artículo: Mora-Páez, H. (2017). Geodesia espacial en la gestión del riesgo: aplicaciones actuales y futuras en Colombia. *Análisis Geográficos*, 52, 143-153.

### Resumen

La geodesia espacial, en los últimos años, se ha convertido en una herramienta fundamental para el estudio de fenómenos asociados a la dinámica terrestre, lo cual permite establecer su papel esencial en el entendimiento y la mitigación de amenazas naturales. Esto implica la conformación de redes geodésicas orientadas a estudios de geodesia tectónica y volcánica, con el propósito de conocer el estado de deformación de la corteza terrestre y sus implicaciones en las posibilidades de ocurrencia de sismos y erupciones volcánicas, así como el empleo de técnicas de interferometría (InSAR) para apoyar estos análisis. Colombia ha venido incursionando desde el Servicio Geológico Colombiano en dichas aplicaciones, abarcando desde el concepto de instrumentación geodésica espacial GNSS hasta el de geodesia de imágenes. Así, el Proyecto GeoRED ha venido implementando gradualmente una red geodésica GNSS para el estudio de la geodinámica en el territorio colombiano, mientras que el proyecto Investigación y Monitoreo de la Actividad Volcánica en Colombia ha realizado la instalación de estaciones geodésicas GNSS en varios edificios volcánicos en el país. Complementariamente, con apoyo de entidades de investigación extranjeras, se han ejecutado actividades de aplicación de interferometría de radar, abarcando incluso el estudio de la subsidencia de la Sabana de Bogotá. En este trabajo se presentan los resultados principales obtenidos hasta 2015 mediante la aplicación de las técnicas mencionadas y se ilustran los aspectos generales del uso de las señales de satélites GNSS con otros propósitos de investigación que apoyarán el avance en el conocimiento del territorio colombiano.

**Palabras clave:** geodinámica, GNSS, ionosfera, meteorología.

<sup>1</sup> Equipo proyecto GeoRED, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia. Correo: hmora@sgc.gov.co, geored@sgc.gov.co.



## Abstract

*Space geodesy has become, in recent years, a fundamental tool for the study of phenomena associated to earth's dynamics, which allows to establish its essential role in the understanding and mitigation of natural hazards. It implies the establishment of geodetic networks aimed to carry out tectonic and volcano geodesy, with the purpose of knowing the deformation of the earth's crust and its implications for the possibilities of earthquakes and volcanic eruptions occurrence, as well as the use of interferometry techniques (InSAR) to support these analyzes. In Colombia, the Colombian Geological Service gradually has been working in such applications, from the concept of GNSS Space Geodetic instrumentation as imaging geodesy. The GeoRED Project has been gradually implementing a GNSS geodetic network for the study of the geodynamics in the Colombian territory; at the same time, the Research and Monitoring of Volcanic Activity in Colombia has installed some GNSS geodetic stations in several volcanic edifices in the country. In addition, with the support of foreign research institutions, some activities have been carried out on the application of interferometry radar, covering even the study of the land subsidence of the Sabana de Bogotá. Preliminary results obtained until now are showed, using the techniques mentioned above. It is being also illustrated the general aspects of the use of GNSS satellite signals with other research purposes, in order to support the advances in the knowledge of the Colombian territory.*

**Key words:** *geodynamics, GNSS, ionosphere, meteorology.*



## Introducción

**P**ara estudiar la deformación de la corteza terrestre en Colombia a partir de datos geodésicos, la primera tarea de un proyecto de geodesia espacial es la estimación de las velocidades relativas, no solo de las placas tectónicas que convergen en la esquina noroccidental de Suramérica, sino también a lo largo de fallas activas, lo cual requiere instalar estaciones permanentes de operación continua, así como estaciones de campo. De esta manera, es posible analizar la tectónica activa actual, importante en términos de la doctrina geológica del uniformitarismo, bajo la condición que “el presente es la clave del pasado”, lo cual significa que los procesos geológicos actuales, al ocurrir a las mismas tasas de movimiento observadas hoy en día y de la misma manera, son responsables de todas las características geológicas de la Tierra, aspecto fundamental para entender la evolución geológica del territorio colombiano.

Bajo esta premisa surge GeoRED, que corresponde a la denominación corta adoptada para el proyecto Implementación de la Red Nacional de Estaciones Geodésicas Espaciales GPS con Propósitos Geodinámicos, y es también el acrónimo de Geodesia: Red de Estudios de Deformación, como aplicación específica en el estudio y análisis de la deformación de la corteza terrestre en Colombia (Mora, 2006). GeoRED es un proyecto de investigación e innovación tecnológica basado en instrumentación geodésica espacial que comenzó en el 2007, en el entonces Instituto Colombiano de Geología y Minería

(Ingeominas), actual Servicio Geológico Colombiano (SGC), como resultado de consideraciones de pertinencia técnica, científica, social, económica y política, orientado a incrementar el grado de conocimiento de la geodinámica en la esquina noroccidental de Suramérica. Es una herramienta esencial para estudiar la deformación de la corteza terrestre, y vital en el análisis de la deformación interplaca e intraplaca, el ciclo sísmico actual, las erupciones volcánicas y los movimientos de masa, entre otros, los cuales son insumos indispensables en la gestión del riesgo por fenómenos naturales.

El Estado colombiano, a través del Servicio Geológico Colombiano y con el apoyo de la cooperación internacional, ha hecho grandes esfuerzos para aumentar la capacidad técnica y científica de obtención, procesamiento, análisis e interpretación de datos relacionados con la geodinámica del territorio, y está dando pasos bien cimentados para mostrar las amenazas potenciales mediante ejercicios de modelamiento. Así, el despliegue de redes instrumentales de sismología de movimiento fuerte, geodesia espacial GPS, con buena densidad en distribución, funcionamiento adecuado a través del tiempo y calidad de datos, con alcance en estudios tectónicos y volcánicos, permitirá avanzar en el conocimiento de los fenómenos geodinámicos mediante una visión multidisciplinaria de los fenómenos que son un factor clave en la formulación de planes locales, departamentales, regionales y nacionales para la gestión del riesgo cuando se trata de fenómenos naturales de alto impacto en la vida, los bienes y la infraestructura.





## Estado actual de la red geodésica del Servicio Geológico Colombiano

El proyecto GeoRED está basado en la aplicación de conceptos fundamentales de geodesia espacial de posicionamiento de alta precisión y en geodesia de imágenes para el estudio de la deforma-

ción de la corteza terrestre en el territorio colombiano. Presta apoyo y ha empezado a incursionar en el desarrollo del concepto de sensoramiento remoto para estudios atmosféricos, mediante la utilización del sistema global de navegación por satélite (GNSS, por la sigla en inglés de Global Navigation Satellite System), término que abarca el conjunto de tecnologías



Figura 1. Mapa de localización de estaciones CORS  
Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2015).

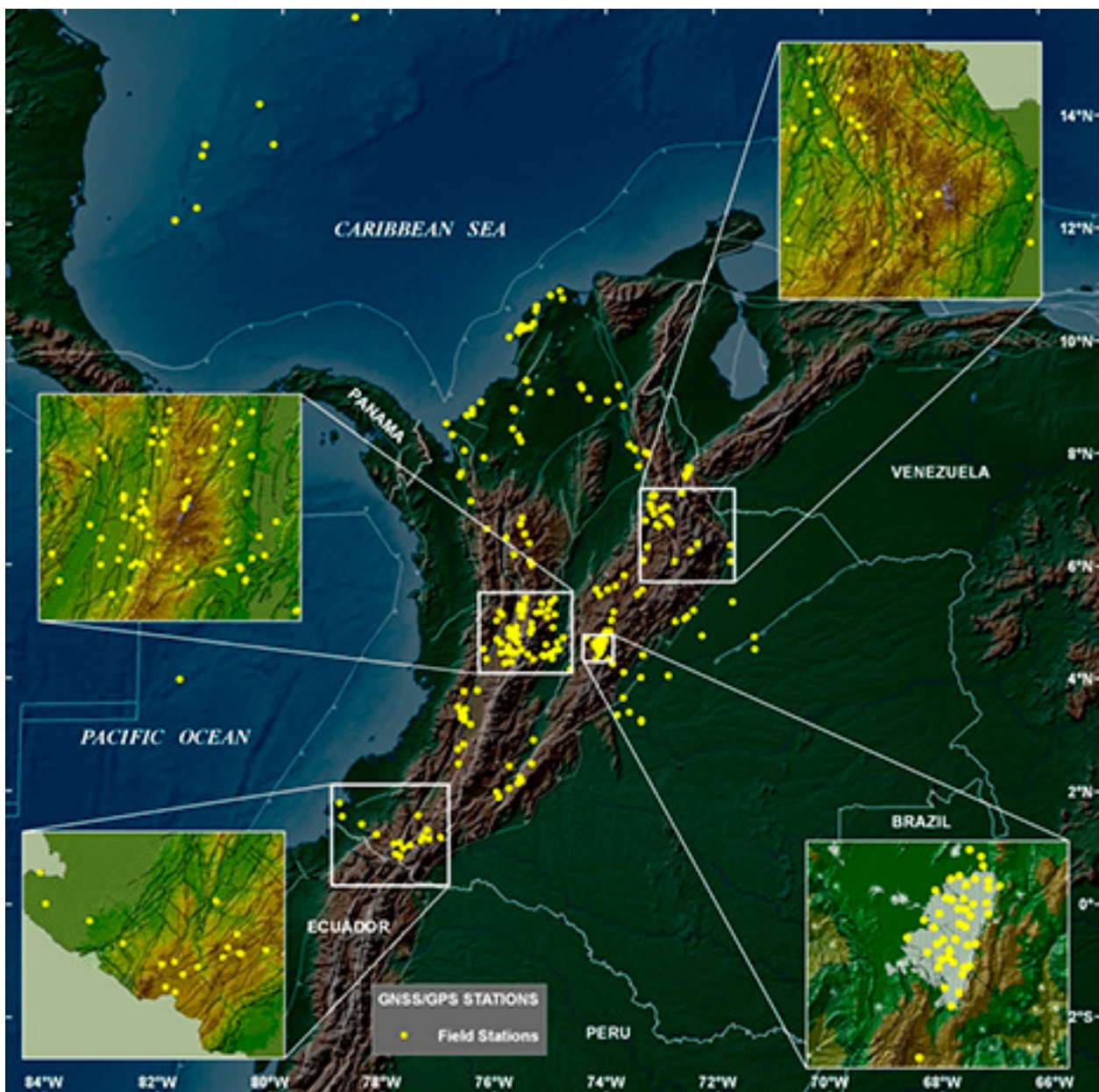


Figura 2. Mapa de localización de estaciones de la red pasiva

Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2015).

actuales de posicionamiento global existentes, así como las que sean desplegadas en el futuro.

GeoRED corresponde a la instrumentación geodésica orientada a entender la interacción de las placas tectónicas que convergen en la esquina noroccidental de Suramérica (Nazca, Caribe y Suramérica)

y dos bloques propuestos (Panamá y Norte de los Andes), las bases físicas de los sismos que ocurren en el país y los procesos magmáticos generados por las erupciones volcánicas.

La evolución reciente de la deformación está estrechamente ligada a la definición de la actividad sísmica. Los estudios



de deformación postsísmica suministran probablemente el mejor constreñimiento en la reología de la corteza y el manto superior, donde es crucial estudiar las fuerzas que generan los sismos y la deformación en los límites de placa en general. La ocurrencia de sismos y de erupciones volcánicas puede estar conectada en algunos casos, y estos fenómenos representan también procesos en un amplio rango de escalas, desde la completa zona del límite de placa hasta la zona núcleo de un sismo.

La red geodésica de GeoRED está basada en la operación de dos tipos de redes: activa y pasiva. La red activa (figura 1) está compuesta por 71 estaciones permanentes GPS/GNSS de operación continua, comúnmente denominadas CORS por la sigla en inglés de Continuously Operating Reference Stations.

La red pasiva (figura 2) está constituida por 301 monumentos construidos en campo que permiten, bajo la modalidad de campañas episódicas, la toma de datos con instrumental geodésico de alta precisión.

Bajo la perspectiva geofísica y geodésica, las deformaciones y los esfuerzos están directamente relacionados con los fenómenos naturales de carácter destructivo que se han presentado en Colombia a lo largo de su historia. El desarrollo de los sistemas de posicionamiento global le brinda a la comunidad geodésica, geofísica y geológica la posibilidad de medir, en tiempo real y con muy alta precisión, los movimientos tectónicos que ocurren a lo largo de las fallas, produciendo deformación que eventualmente es liberada como sismos y como inflación o deflación de los conos volcánicos que suele producirse antes de la liberación de presión a profundidad

previa a cualquier erupción volcánica. Como estos movimientos son sutiles y difíciles de detectar, se requiere tecnología de alta precisión para registrarlos y medirlos.

En este sentido, es importante destacar cómo a través del proyecto Inventario y Monitoreo de Geoamenazas y Procesos en las Capas Superficiales de la Tierra, en lo concerniente a investigación y monitoreo, y bajo el concepto de *geodesia volcánica*, se han instalado 15 estaciones GPS con el fin de realizar estudios de deformación, aspecto fundamental en la evaluación del estado de la actividad volcánica.

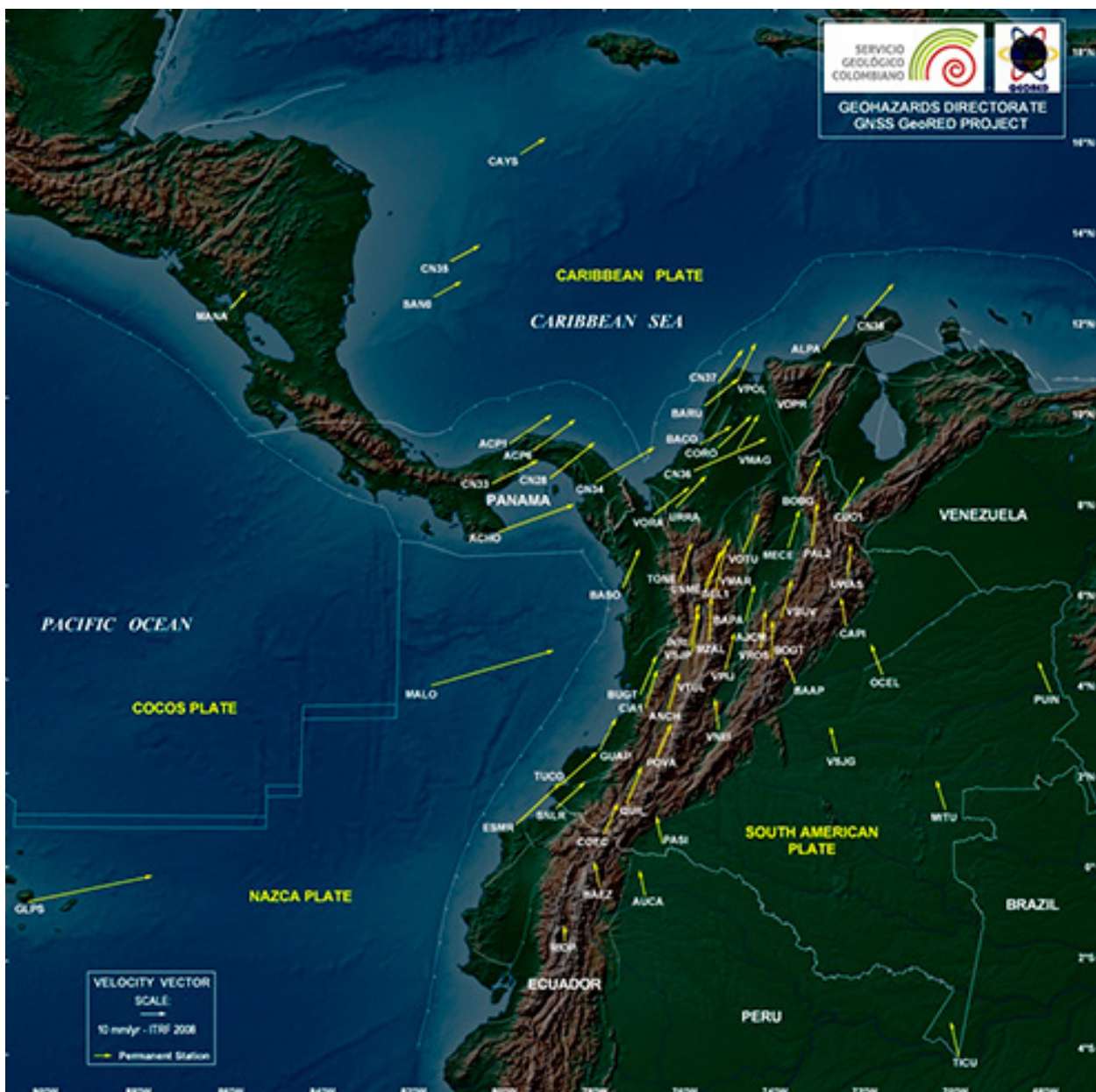
El procesamiento de los datos de las estaciones del proyecto GeoRED, tanto CORS como de campo, es realizado mediante el software GIPSY-OASIS II (por la sigla en inglés de GNSS Inferred Positioning System Orbit Analysis And Simulation Software), v. 6.3, desarrollado por el Jet Propulsion Laboratory (JPL), el California Institute of Technology (Caltech) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, por su sigla en inglés), que es empleado por el Servicio Geológico Colombiano en virtud de convenio de cooperación internacional.

El procesamiento es diario, lo que permite la generación de series de tiempo geodésicas. A partir de dicho procesamiento, se generan las velocidades de desplazamiento de cada una de las estaciones. La figura 3 muestra los vectores de velocidad para las estaciones CORS que tienen observación superior a tres años, lo cual garantiza una alta confiabilidad de los resultados. Estos vectores están expresados en función del marco de referencia global International Terrestrial Reference Frame ITRF2008.



También se ha avanzado en la integración de datos de geodesia espacial y de geodesia de imágenes (interferometría de radar) como aplicación específica en el estudio de la subsidencia de la Sabana de Bogotá. Igualmente, en trabajo conjunto con la Dirección General Marítima, se está haciendo la conexión geodésica de los mareógrafos que dicha entidad ha instalado.

GeoRED ha incursionado además en estudios de la atmósfera en dos de sus componentes, la ionosfera y la troposfera. En el primero, toma en consideración que la naturaleza dispersiva de las cargas eléctricas de la ionosfera infiere un retraso en la señal GPS observada, causando errores en las mediciones de rango y, subsecuentemente, errores en el posicionamiento.



**Figura 3.** Vectores de velocidad CORS expresados en ITRF2008  
Fuente: Servicio Geológico Colombiano (2015).





La señal GPS, al igual que cualquier onda electromagnética, es afectada por la carga eléctrica del plasma ionizado dispuesto en la ionosfera y en la plasmosfera; para el análisis respectivo se realiza el cálculo del contenido total de electrones (TEC). En el segundo, el fundamento estriba en las observaciones de vapor de agua en una red superficial de receptores de posicionamiento global GPS, bajo la consideración de que las señales GPS, como frecuencias continuas de radio, son retardadas por la atmósfera debido a la refracción atmosférica y la desviación de la señal (curqueo); este “ruido” de origen atmosférico es una fuente de información para las ciencias atmosféricas y la meteorología.

## Cooperación

Los logros y resultados que el proyecto GeoRED ha alcanzado están soportados en la cooperación tanto internacional como nacional. Se destaca el apoyo de instituciones tales como la NASA, JPL, Caltech y Unavco, así como de las universidades de Carolina del Sur, Colorado, Nevada, Boston College y Estatal de Pensilvania, en Estados Unidos, y de la Universidade da Beira Interior, en Portugal, a través del Laboratorio de Análisis de Geodesia Espacial y Terrestre. También es importante destacar el intercambio de datos con nuestros países vecinos, como Venezuela, con la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas, Ecuador, a través del Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica de Quito, la Autoridad del Canal de Panamá y el Radio-Observatorio de Jicamarca del Instituto Geofísico del Perú.

En el ámbito nacional, se destaca la colaboración de entidades como la Aeronáutica Civil, la Fuerza Aérea Colombiana, la Armada Nacional, la Dirección General

Marítima, Cenicaña, el Ingenio Risaralda, la Gobernación de Caldas (Aeropuerto La Nubia), el Municipio de Pereira (Aeropuerto Matecaña), la Empresa Hidroeléctrica de Urrá, HOCOL, la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, el Cerrejón, Brinsa, el municipio de Guicán, la Gobernación de Boyacá, Parques Nacionales Naturales, la Empresa de Energía Eléctrica del Pacífico, las corporaciones autónomas regionales de Caldas y Risaralda, las universidades Nacional y del Valle, a través del Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano, y del Quindío, con el Observatorio Sismológico del Quindío, así como de los propietarios de predios privados, entre otros.

## Conclusiones

Una red geodésica espacial permite realizar una validación tectónica de modelos geológicos estructurales. La integración de información geodésica con la obtenida por medio de otras técnicas y disciplinas permite conocer el estado de deformación y el campo de esfuerzos regional actual, además de proporcionar información básica que sirve de referencia para estudios aplicados a la geología económica a partir del conocimiento de los ambientes geológicos. En Colombia, el Servicio Geológico Colombiano, a través del proyecto GeoRED, ha avanzado sustancialmente en la aplicación de tecnología geodésica espacial con propósitos geodinámicos. Así, se tiene el campo de velocidades geodésicas del territorio colombiano y se han empezado a adelantar acciones en el modelamiento de la deformación de la corteza terrestre bajo la aproximación de bloques geológicos, como paso inicial para determinar las tasas de deformación.

El creciente aumento del espectro de aplicaciones de la tecnología GPS en diversas ramas de las geociencias permite orientar muchas acciones al “estudio integral de las sinergias naturales y humanas en la interfase geosfera-biosfera-atmósfera” (Ingeominas, 2010, p. 17), lo que le da un valor agregado adicional por su potencial contribución a proyectos de importancia e impacto global. Bajo estas consideraciones, las aplicaciones del estudio de las señales provenientes de los satélites GNSS para estudios de la atmósfera (ionosfera y troposfera) crecen gradualmente, investigaciones en las cuales GeoRED ha venido igualmente incursionando.





## Bibliografía

---

---

### Bibliografía citada

Mora, H. (2006). *Red Nacional de Estaciones Geodésicas Satelitales GPS con propósitos geodinámicos*. Propuesta de proyecto presentada al Ministerio de Minas y Planeación Nacional, Documento del Banco de Programas y Proyectos de Inversión Nacional (BPIN).

Ingeominas (2010). Proyecto GeoRED: nueva herramienta de alta precisión para estudiar la deformación de la corteza terrestre en Colombia. *Ingeominas al Día*, 2, 14-18.

### Bibliografía consultada

Allmendinger, R., Loveless, J., Pritchard, M. & Meade, B. (2009). From decades to epochs: Spanning the gap between geodesy and structural geology of active mountain belts. *Journal of Structural Geology*, 31, 1409-1422.

Cai, J., Wang, J., Wu, J., Hu, C., Grafarend, E. & Chen, J. (2008). Horizontal deformation rate analysis based on multiepoch GPS measurements in Shanghai. *Journal of Surveying Engineering*, 134(4), 132-137.

Cong, D. C. & Feigl, K. L. (1999). Geodetic measurement of horizontal strain across the Red River fault near Thac Ba, Vietnam, 1963-1994. *Journal of Geodesy*, 73, 298-310.

Delacou, B., Sue, C., Nocquet, J. M., Champagna, J. D., Allan, C. & Burkhard, M. (2008). Quantification of strain rate in the Western Alps using geodesy: comparisons with seismotectonics. *Swiss Journal of Geosciences*, 101(2), 377-385.

Guohua G., Meng Guojie M. & Wuxing W., (2011). Anomalous crustal movements before great Wenchuan earthquake observed by GPS. *Geodesy and Geodynamics* 2(2), 13-22.

Hack, M., Malservisi, R. & Wdowinski, S. (2009). Strain Rate Patterns from Dense GPS Networks. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 9, 1177-1187.

Kobayashi, D., LaFemina, P., Geirsson, H., Chichaco, E. Abrego, A., Mora, H. & E. Camacho. (2014). Kinematics of the western Caribbean: Collision of the Cocos Ridge and upper plate deformation. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 15(5), 1671-1683.



- LaFemina, P., Mora, H., Kobayashi, D. & Fernandes, R. (2014). Deformation of the Western Caribbean and Northwestern South America From GPS Geodesy. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 16, p. 13436, Vienna, Austria.
- McCaffrey, R. (2000). Crustal block rotations and plate coupling. In: S. Stein & J. Freymueller (Eds.) *Plate Boundary Zones* (pp. 101-122). AGU Geodynamics Series 30. Recuperado de [http://web.pdx.edu/~7Emccaf/pubs/mccaffrey\\_blocks\\_agu\\_2002.pdf](http://web.pdx.edu/~7Emccaf/pubs/mccaffrey_blocks_agu_2002.pdf).
- Meade, B. & Loveless, J. P. (2009), Block Modeling with Connected Fault-Network Geometries and a Linear Elastic Coupling Estimator in Spherical Coordinates. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 99(6), 3124-3139.
- Mora, H. (2005). Aplicaciones geodésicas satelitales en Ingeominas, Colombia. *Boletín del Proyecto Multinacional Andino PMA:GCA*, 5(5), 2.
- Plag, H. P., Gross, R. & Rothacher, M. (2009). Global Geodetic Observing System for Geohazards and Global Change. *Geosciences, BRGM's Journal for a Sustainable Earth*, 9, 96-103.
- Rocken, C., Ware, R., Van Hove, T., Solheim, F., Alber, C. & Johnson, J. (1993). Sensing Atmospheric Water Vapor with the Global Positioning System. *Geophys. Res. Lett.*, 20, 2631-2634.
- Sanso, F. (Ed.) (2005). *A Window on the Future of Geodesy*. Proceedings of the IAG, IAG General Assembly, Sapporo, Japan, June 30-July 11, 2003. Germany: Springer-Verlag.
- Tregoning, P., Boers, R., O'Brien, D. & Hendy, M. (1998). Accuracy of absolute precipitable water vapor estimates from GPS observations. *J. Geophys. Res.*, 103, D22, 28701-28710.
- Yahya, M. F. & Kamarudin, M. N. (2008). *GPS for Meteorology Applications in Malaysia*. International Conference on Environmental Research and Technology (ICERT 2008). Recuperado de [https://www.academia.edu/8988216/GPS\\_for\\_Meteorology\\_Applications\\_in\\_Malaysia](https://www.academia.edu/8988216/GPS_for_Meteorology_Applications_in_Malaysia).





**IGAC**  
INSTITUTO GEOGRÁFICO  
AGUSTÍN CODAZZI



**TODOS POR UN  
NUEVO PAÍS**  
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN



# CIAF

Desarrollo de **8 programas de formación** avanzada en convenio con universidades:



**AÑOS**  
1967 • 2017

Centro de Investigación y Desarrollo  
de Información Geográfica - CIAF

Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia	Maestría en Geografía y Doctorado en Geografía
Universidad Nacional de Colombia	Maestría en Geomática
Universidad Católica de Manizales	Maestría en Teledetección
Universidad de Manizales	Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Universidad Francisco José de Caldas	Especialización en Sistemas de Información Geográfica y Especialización en Avalúos
Universidad Sergio Arboleda	Maestría en Gestión de Información y Desarrollo de Tecnologías Geoespaciales



**Más de 440 colombianos  
capacitados y 170 extranjeros**

## Modelos de regresión espacial para describir el comportamiento del cáncer gástrico en Colombia para el periodo 2005-2012

### *Spatial regression models to describe gastric cancer behavior in Colombia 2005-2012*

Francisco Javier Sarmiento Parra<sup>1</sup>, Cristhian Eduardo Murcia Galeano<sup>2</sup>,  
Luis Fernando Santa Guzmán<sup>3</sup>, Luis Fernando Gómez Rodríguez<sup>4</sup>

“Cómo citar este artículo: Sarmiento Parra, F. J., Murcia Galeano, C. E., Santa Guzmán, L. F. y Gómez Rodríguez, L. F. (2017). Modelos de regresión espacial para describir el comportamiento del cáncer gástrico en Colombia para el periodo 2005-2012. *Análisis Geográficos*, 52, 155-173.

### Resumen

El cáncer gástrico encabeza la lista de muertes causadas por enfermedades en Colombia, y por ello su prevención, detección temprana y tratamiento se ha convertido en política de Estado. Teniendo en cuenta lo anterior, este estudio se centró en describir el comportamiento del cáncer gástrico en Colombia a nivel municipal para el periodo 2005-2012, mediante modelos de regresión espacial clásicos que permitieron identificar factores potenciales de riesgo asociados al fenómeno y mapas de la enfermedad. Mediante este análisis se logró determinar patrones y agregaciones espaciales, y clasificar el territorio por zonas, de acuerdo con el nivel de riesgo de prevalencia de la enfermedad.

**Palabras clave:** modelos lineales generalizados mixtos, regresión binomial negativa, vectores propios de Moran, cáncer gástrico.

### Abstract

*Gastric cancer heads the list of deaths caused by diseases in Colombia, and therefore, its prevention, early detection, and treatment, has become a State policy. This research describes the behavior of gastric cancer in Colombia at the municipal level for the period 2005-2012, using classic spatial regression models, that allowed to identify potential risk factors associated with the phenomenon, and maps of the disease. Through this analysis was possible to determine spatial patterns and clusters, and to classify the territory by zones according to level of risk of prevalence of the disease.*

**Keywords:** *generalized linear mixed model; negative binomial regression; Moran eigenvectors; gastric cancer.*

<sup>1</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo: fjsarmientop@gmail.com.

<sup>2</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo: cristhianmurcia182@gmail.com.

<sup>3</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo: lfsantag@unal.edu.co.

<sup>4</sup> Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá, Colombia. Correo: luuruena@yahoo.es.





## Introducción

La mayor prevalencia como primera causa de muerte por cáncer en el país, tanto en hombres como en mujeres, es el cáncer de estómago, también llamado cáncer gástrico (Daza, 2012), el cual posee varias características relevantes por las que es pertinente analizarlo, como el hecho de que presenta un notorio patrón de riesgo que muestra relación con la altitud en toda la región andina (lo cual destaca, además, diferencias entre grupos étnicos presentes en las regiones) (Piñeros *et al.*, 2010), y el hecho de que existe una alta asociación entre la adquisición de la bacteria *Helicobacter pylori* (*H. pylori*) en la niñez y el desarrollo de un cáncer de estómago en la adultez (Correa, 2011), identificándose que dicha infección bacterial es el factor de riesgo más importante para el desarrollo del cáncer gástrico (Strebel *et al.*, 2010).

A partir de diversos estudios epidemiológicos realizados por varios autores, se sabe además que este tipo de cáncer se asocia con distintos factores de riesgo bien identificados, tales como los ingresos, las condiciones de vida, el nivel educativo o el tipo de seguridad social que tiene la población (Daza, 2012), e incluso factores como las condiciones de vida en la niñez, el tamaño de las familias, la higiene o la calidad del agua que se consume han sido identificados como relevantes para la prevalencia del *H. pylori* (Strebel *et al.*, 2010), y, por tanto, corresponderían a factores indirectos importantes para la generación de cáncer gástrico.

Debido a las características y los comportamientos de las enfermedades, las cuales se encuentran en función de las

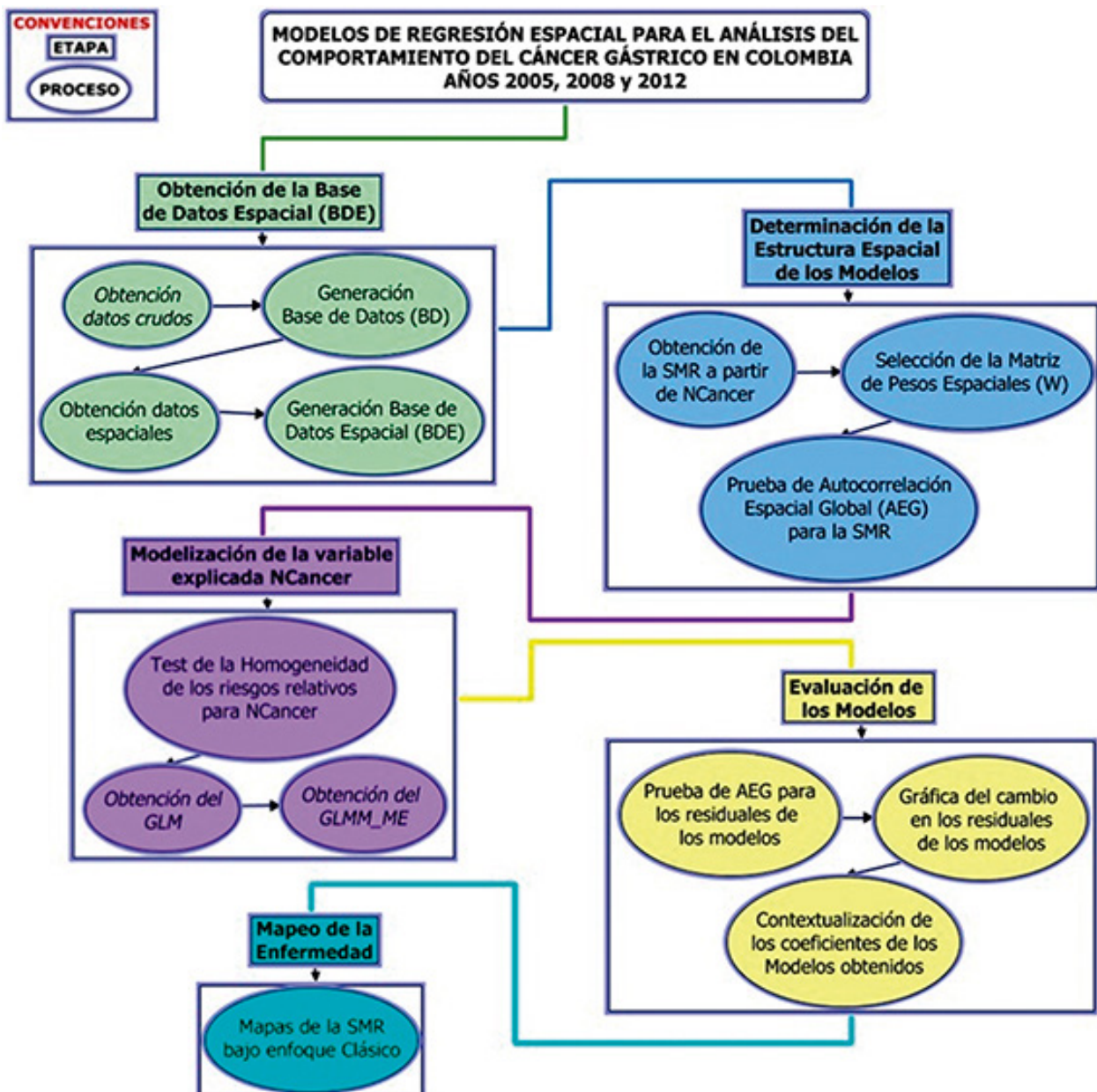
dimensiones temporal, espacial y poblacional, se hace necesario utilizar herramientas y métodos como los que proporciona la estadística espacial, cuyo objetivo es el análisis y modelado de estructuras de dependencia espacial, que además son de gran utilidad para comprobar hipótesis etiológicas (Waller & Gotway, 2004). Teniendo en cuenta esto, en el presente documento se describe el comportamiento del cáncer gástrico en Colombia a nivel municipal para los años 2005, 2008 y 2012, mediante modelos de regresión espacial y el mapeo del riesgo de la enfermedad, con lo que se busca explicar las causas que lo originan y dar pautas concisas para una política de salud confiable.

## Materiales y métodos

Los softwares utilizados para llevar a cabo el análisis son:

- R v3.1.1: plataforma sobre la que se desarrollan todos los procesos de estadística espacial de este trabajo.
- ArcGIS v10.2 (licencia estudiantil): se hace uso principalmente de las herramientas de unión por atributos y unión espacial, además de ser útil para generar las salidas gráficas presentadas y para la obtención de una variable a partir del modelo digital de elevación ASTER GDEM V2 utilizando el módulo de ArcGIS 3D Analyst.

La siguiente figura muestra un esquema que sintetiza la metodología desarrollada en el proyecto.



**Figura 1.** Esquema de la metodología utilizada en el proyecto.

Fuente: elaboración de los autores.





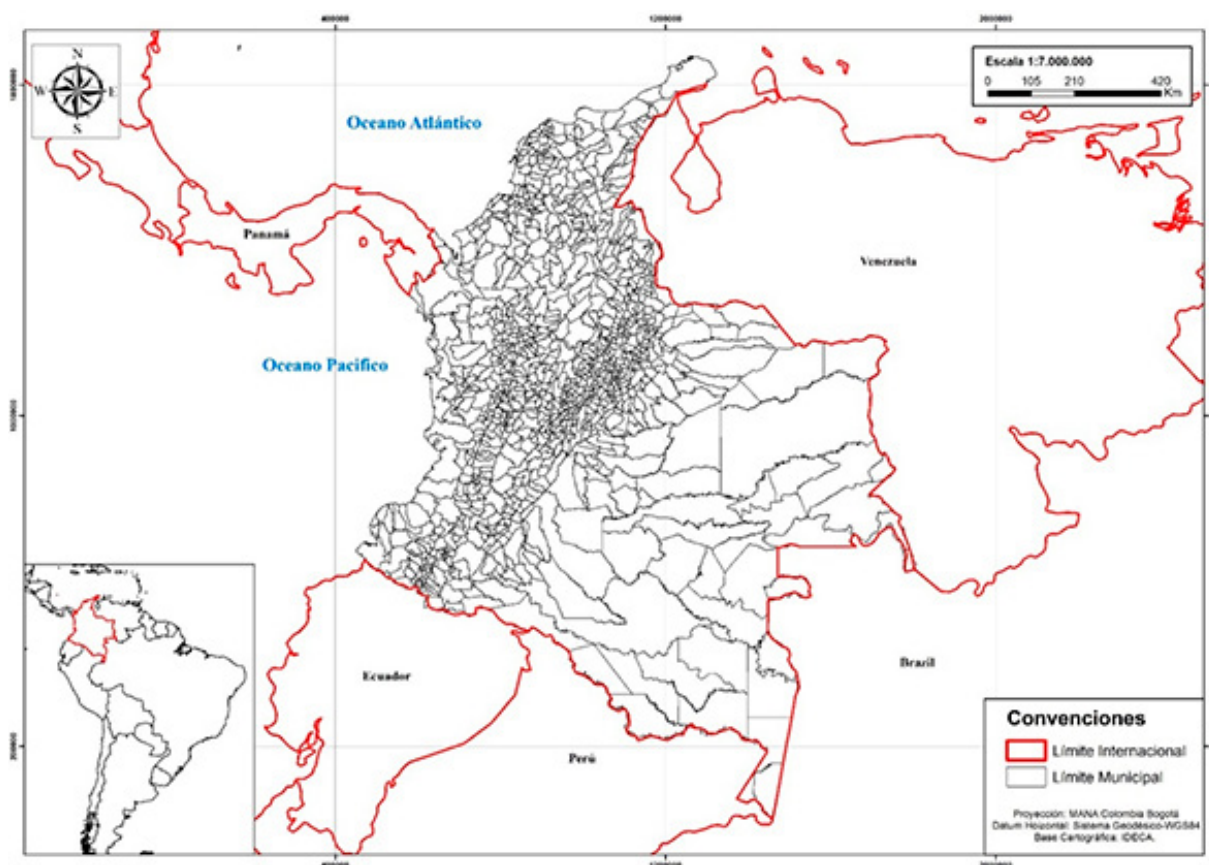
## Obtención de la base de datos espacial

El área bajo investigación corresponde a los 1122 municipios de Colombia (figura 2).

Para desarrollar el proyecto, se utilizó una base de datos espacial (BDE) almacenada en un archivo de formas (shapefile). Para crearla, se utilizó información referente al número total de muertes ocurridas por cáncer gástrico durante el periodo 2005-2012 para cada uno de los municipios del país, que fue proporcionada inicialmente (en Excel) por el Departamento de Epidemiología y Demografía del Ministerio de Salud, y se añadió información sobre

otras variables escogidas con base en estudios etiológicos selectos, obteniendo así la base de datos (BD) inicial con la que se formularían los modelos (tabla 1).

Para las variables ubicadas en las celdas de color verde, se escogieron los años 2005, 2008 y 2012, debido a que son representativos durante el periodo de análisis, y principalmente por la disponibilidad de los datos en el Sistema de Información Geográfica para el Ordenamiento Territorial (SIG-OT) y los gestores de bases de datos del DANE y el DNP. Las variables ubicadas en las celdas de color azul no se discriminaron para cada año, porque se calcularon con base en estudios



**Figura 2.** Área de estudio del análisis  
Fuente: elaboración de los autores.

Tabla 1. Elementos de la BD

<i>Elemento/Variable</i>	<i>Expresión</i>	<i>Unidad/Fuente</i>
<i>NCancer (explicada)</i>	<i>Número de muertes por causa de cáncer gástrico a nivel municipal.</i>	<i>Número/Ministerio de Salud</i>
<i>NPer</i>	<i>Número total de personas que residen por municipio [urbano/rural].</i>	<i>Número/DANE</i>
<i>IDMun</i>	<i>Índice con escala de 0 a 100 del desempeño de los municipios en un año determinado.</i>	<i>Índice/DNP</i>
<i>PEdu</i>	<i>Porcentaje de la cobertura bruta de educación.</i>	<i>Porcentaje/Ministerio de Educación</i>
<i>IGMun</i>	<i>Índice que mide la capacidad administrativa, financiera y sectorial del municipio.</i>	<i>Porcentaje/DNP</i>
<i>PMun</i>	<i>Posición asignada al municipio dentro del departamento.</i>	<i>Número/DNP</i>
<i>PNbi</i>	<i>Porcentaje de personas que tienen insatisfecha alguna de las necesidades definidas como básicas.</i>	<i>Porcentaje/DANE</i>
<i>NperAfro</i>	<i>Porcentaje de personas afrodescendientes para cada municipio con respecto a la población total.</i>	<i>Porcentaje/DANE</i>
<i>AMsnm</i>	<i>Altura media sobre el nivel del mar para cada municipio del país.</i>	<i>Número/ASTER GDEM V2-NASA- Modulo 3D Analyst de ArcGIS 10.2</i>

DNP: Departamento Nacional de Planeación.

DANE: Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

MPS: Ministerio de la Protección Social.

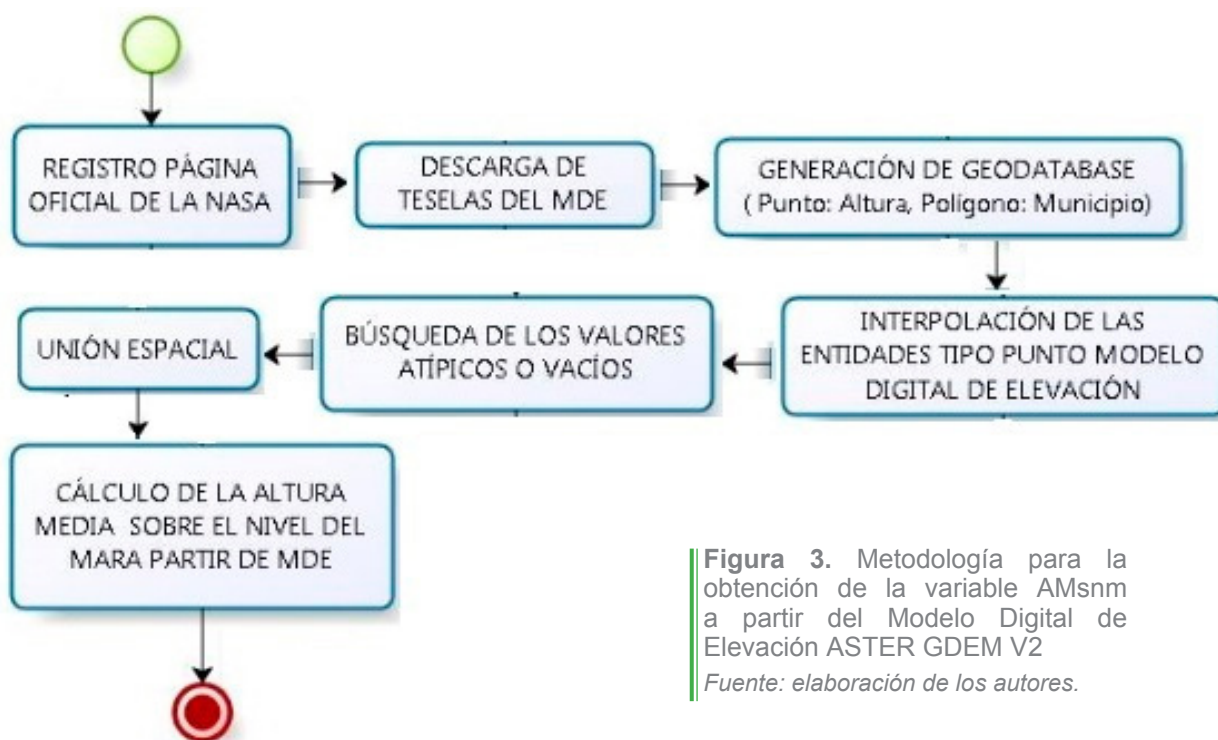
**Fuente:** elaboración de los autores.

realizados por el DANE entre los años 2000-2011, y no se dispone de información desagregada. La variable ubicada en la celda de color rojo no varía en el tiempo, por esta razón su valor es el mismo en el periodo 2005-2012.

Se ejecutó una metodología especial para calcular la variable AMsnm, debido a que

esta información no estaba disponible para todos los municipios del país. El procedimiento se explica de forma detallada en la figura 3. Las otras variables no requirieron intervención adicional porque al ser descargadas de los gestores de bases de datos del SIG-OT, DANE y DNP ya se encontraban estandarizadas y desagregadas a nivel municipal.





**Figura 3.** Metodología para la obtención de la variable AMSnm a partir del Modelo Digital de Elevación ASTER GDEM V2

Fuente: elaboración de los autores.

Esa BD se unió a un shapefile de los municipios de Colombia, tomando como atributo identificador el código DANE del municipio, que se encontraba tanto en la BD como en el shapefile, generando así la BDE.

También se utilizaron las coordenadas de los principales centros poblados (en el sistema de proyección local Magna Sirgas, origen Magna Colombia Bogotá) de cada municipio del país. Estas fueron usadas en el cálculo de las matrices de contigüidad para cada año, y a su vez sirvieron para obtener las matrices de pesos espaciales asociadas. Dichas coordenadas fueron obtenidas a partir de información cartográfica digital (shapefile) del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

### **Determinación de la estructura espacial de los modelos**

Una vez consolidada la BD, con la

información de NCancer y NPer, se procedió a calcular la tasa de mortalidad estandarizada (SMR, de la sigla en inglés de Standardized Mortality Rate). La SMR es un estadístico muy difundido para representar los patrones espaciales de la distribución de una enfermedad y estandariza los datos, reexpresándolos como la proporción entre el número de casos observados y el número de casos esperados. Se define como (Waller & Gotway, 2004):

$$SMR_i = \frac{NCancer_i}{E_i} \quad (1)$$

Donde:  $NCancer_i$  es el número de casos observados en una región  $i$ , y  $E_i$  el número de casos esperados,  $i$  que a su vez se define como:

$$E_i = \frac{\sum NCancer_i}{\sum NPer_i} NPer_i \quad (2)$$

Donde  $NPer_i$  es el número de personas con riesgo de contraer la enfermedad en el área  $i$ . Este procedimiento se repite para cada año: 2005, 2008 y 2012.

Para definir la mejor matriz de pesos espaciales, fue necesario evaluar distintos tipos de matrices de contigüidad. Se evaluaron en total 10 criterios de contigüidad, a saber: torre (*Rook*), reina (*Queen*), triangulación de Delaunay (*Tri*), esfera de influencia (*Sph*), gráfica de Gabriel (*Gab*), vecinos relativos (*VeR*) y  $n$ -vecinos más cercanos con  $n=1$  (*knn1*),  $n=2$  (*knn2*),  $n=3$  (*knn3*) y  $n=4$  (*knn4*). Estas se obtienen mediante las funciones *poly2nb*, *tri2nb*, *graph2nb* y *knn2nb*, todas ellas, de la librería *spdep* de R.

La matriz de contigüidad que presentó el menor valor para el coeficiente del criterio de información de Akaike (AIC, de la sigla en inglés de Akaike Information Criterion) fue seleccionada, pues es la que representa mejor la dependencia espacial presente en la variable endógena. Para evaluar el índice AIC en R se hizo uso de la función *test.W* de la librería *spacemakeR*. A continuación se define la matriz de pesos espaciales ( $W$ ), la cual tiene la siguiente forma (Bivand, Pebesma & Gómez-Rubio, 2008):

$$W = \begin{bmatrix} 0 & \cdots & w_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{n1} & \cdots & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Donde  $w_{ij}$  refleja la intensidad de la dependencia espacial entre pares de regiones; así, las que están más cerca tendrán un peso mayor en el cálculo con respecto a las que están más lejos. La obtención de la matriz de pesos espaciales a través de

la matriz de contigüidad seleccionada es directa mediante la función *nb2listw* de la librería *spdep* de R.

Enseguida, se evaluaron las pruebas de autocorrelación espacial global (AEG) de la  $I$  de Moran, y la  $C$  de Geary. Para su cálculo se utilizó la librería *spdep* del software R, con las funciones *moran.test* y *geary.test*.

La  $I$  de Moran es un coeficiente que mide la similitud de una variable con respecto a áreas que están espacialmente relacionadas. Se denota como (Waller & Gotway, 2004):

$$I = \frac{n \sum_i \sum_j w_{ij} [SMR_i - \overline{SMR}] [SMR_j - \overline{SMR}]}{[\sum_i \sum_j w_{ij}] \sum_k (SMR_{ji} - \overline{SMR}n)^2} \quad (4)$$

Donde:

$\overline{SMR}$  es la media de la SMR en todas las unidades espaciales,

$w_{ij}$  refleja la intensidad de la dependencia espacial entre las regiones  $i$  y  $j$ , y

$n=1122$  corresponde al total de unidades espaciales.

Una  $I$  de Moran de 0 indica que se acepta la hipótesis nula de no agregación, es decir que los datos se distribuyen de forma aleatoria; un valor positivo indica una agregación de áreas cuyos atributos presentan valores similares, y un valor negativo indica que regiones vecinas presentan valores disimilares de un atributo.

La  $C$  de Geary es un coeficiente similar a la  $I$  de Moran, pero no considera la similitud entre regiones vecinas, sino entre





pares de regiones. Su rango oscila entre 0 y 2, donde cero indica perfecta autocorrelación espacial positiva, y dos, perfecta autocorrelación espacial negativa para cualquier par de regiones. Este coeficiente se representa como (Waller & Gotway, 2004):

$$C = \frac{(n-1) \sum_i \sum_j W_{ij} (SMR_i - SMR_j)^2}{2 \sum_j W_{ij} (SMR_i - \overline{SMR})^2 (\sum_i \sum_j W_{ij})} \quad (5)$$

### Modelización de la variable explicada

El primer paso en esta etapa fue evaluar la homogeneidad de los riesgos relativos para NCancer en cada año de estudio, lo cual permite identificar si la mejor distribución estadística para modelar ese fenómeno es la distribución de Poisson o la distribución binomial negativa. La prueba se define como (Bivand, Pebesma & Gómez-Rubio, 2008):

$$x^2 = \sum_{i=1}^n \frac{[NCancer_i - \theta E_i]^2}{\theta E_i} \quad (6)$$

Donde  $\theta$  es la SMR global que asintóticamente sigue una distribución chi cuadrado con n grados de libertad.

La prueba considera como hipótesis alternativa que no todos los riesgos relativos son iguales, y en ese caso el mejor modelo de regresión espacial es uno de tipo binomial negativo. En R, se hace uso de la función `achisq.test` de la librería `DCluster` para evaluar esa prueba.

Enseguida se estimaron dos tipos de modelos de regresión. En el primero se evaluó un modelo lineal generalizado (GLM, de la sigla en inglés de Generalized Linear Model) sin estructura espacial, el cual se define como (Dunteman & Ho, 2006):

$$g(\mu_i) = \beta_0 + \beta_{x_{1i}} + \beta_{x_{2i}} + \dots + \beta_{x_{mi}} \quad (7)$$

Donde:

el término  $\mu_i$  es la variable dependiente bajo análisis,

x representa las covariables explicativas almacenadas en una matriz de tamaño ( $m \times i = 7 \times 1122$ ) y

g(.) es la función de enlace que transforma la variable respuesta en un predictor lineal.

El término  $\mu_i$  sigue una distribución de Poisson cuando representa el número de eventos que ocurren en un intervalo temporal o espacial de tamaño dado, tal como NCancer. Esto se denota como (Waller & Gotway, 2004):

$$p[NCancer; \mu] = \begin{cases} \frac{e^{-\mu} \mu^y}{NCancer!}, & \text{para } NCancer = 0, 1, 2, \dots; \mu > 0 \\ 0, & \text{en cualquier otro caso} \end{cases} \quad (8)$$

Donde  $\mu = E\theta$ , corresponde a la media de casos en cada región para el conteo de eventos regionales  $NCancer_1, \dots, NCancer_i$  independientes, e idénticamente distribuidos como variables aleatorias de Poisson, con media y varianza igual  $E[NCancer_i]$ . El valor esperado se puede modelar con una regresión de Poisson en función de covariables regionales como (Waller & Gotway, 2004):

$$\log[E(NCancer_i)] = NCancer_i \beta_i, E(NCancer_i) = \exp(NCancer_i \beta_i) \quad (9)$$

Cuando  $NCancer_i$  presenta sobredispersión, de modo que la variación de los datos sea mayor a su media, no se recomienda utilizar una distribución de Poisson en las variables, y el modelo de regresión lineal debe ser ampliado para que se permita una mayor varianza. Esto se logra asumiendo que los datos sigan una distribución binomial negativa, que puede ser considerada como un modelo mixto que involucra un efecto aleatorio  $\theta$ , que sigue una distribución gamma. Esta distribución se conoce con el nombre de Poisson-Gamma ( $PG$ ), y se estructura en dos niveles (Bivand, Pebesma & Gómez-Rubio, 2008):

$$NCancer_i | \theta E_i \sim \text{Poisson}(NCancer_i E_i) \quad (10)$$

$$\theta \sim \text{Gamma}(v, \alpha) \quad (11)$$

El riesgo relativo  $\theta$  corresponde a una variable aleatoria que se extrae de una distribución gamma con media  $v/\alpha$  y varianza  $v/\alpha^2$ . Nótese que en la ecuación 10 la distribución  $NCancer_i$  está condicionada por el valor de  $\theta$ . La distribución condicionada de  $NCancer_i$  es una binomial negativa con probabilidad  $\frac{\alpha}{\alpha+E}$  y tamaño  $v$ .

Es necesario evaluar un segundo tipo de modelo debido a que los GLM tan solo son adecuados si se asumen los supuestos de que los datos observados son independientes, y de que la variación espacial observada en los resultados del modelo es explicada por las covariables (Dunteman & Ho, 2006), algo que no ocurre en los fenómenos reales, dada su complejidad.

La forma de cumplir con los supuestos es utilizando un modelo lineal generalizado mixto (GLMM, de la sigla en inglés de Generalized Linear Mixed Model) (Kaiser, Cressie & Lee, 2002), en el que se establece que la distribución de cada resultado depende de procesos espaciales no observados, que explican los patrones espaciales entre eventos.

Acá entran en juego los vectores propios de Moran (ME, de la sigla en inglés de Moran Eigenvector), que se obtienen a partir de las matrices  $W$ , y cuyo objetivo es ser añadidos a un GLM y, de esa manera, provocar que la dependencia espacial presente en los residuales del modelo sin estructura espacial pueda ser movida y tenida en cuenta dentro de dicho modelo, obteniendo así un GLMM\_ME, lo que significa que estos vectores pueden ser usados como variables representativas de agentes demográficos y causales, para así lidiar con la autocorrelación y la multicolinealidad (Voutilainen *et al.*, 2014). Este método utiliza fuerza bruta para buscar el conjunto de ME de la matriz  $W$  que se define como (Dray, Legendre & Peres-Neto, 2006):

$$ME = MWM \quad (12)$$

Donde:

$M$  es una matriz proyección simétrica e idempotente (es decir que la matriz es igual a su cuadrado) y

$W$  son los pesos espaciales.

Además  $M$  se define como:



$$M = I - X[X^T X]^{-1} X^T \quad (13)$$

Donde:

I: es la matriz identidad, y

X: es un vector de unos de tamaño n, que funciona solo como un intercepto.

Los ME que son incluidos se escogen calculando los valores empíricos de la I de Moran del modelo de regresión inicial más cada uno de los ME de las matrices de ponderaciones espaciales simétricas doblemente centradas. El primer ME se escoge como aquel que posee el menor valor de la I de Moran. El procedimiento se repite hasta que el menor valor de la I de Moran remanente tiene un valor de probabilidad basado en permutaciones, arriba de un valor  $\alpha$  establecido. Al final se escoge el subconjunto de  $n$  ME que reducen el residual de autocorrelación espacial en el error del modelo con covariables (Dray, Legendre & Peres-Neto, 2006).

Para esta etapa, las principales funciones a utilizar son glm o glm.nb de la librería MASS y ME de la librería spdep, todas ellas, del software R.

### **Evaluación de los modelos**

En esta etapa se utilizaron principalmente los coeficientes AIC de cada modelo obtenido en la etapa anterior, los gráficos de diferencia entre los residuales para cada uno de los años, el análisis de los residuales mediante pruebas de autocorrelación espacial para analizar cómo fue tenida en cuenta la dependencia espacial en cada tipo de modelo y año, y se interpretan los coeficientes de los modelos obtenidos para evaluar si sus valores concuerdan con la información empírica que se posee de la

enfermedad, prestando especial atención al signo de los coeficientes, y si los valores son similares en cada uno de los tres años de estudio. La principal función de R utilizada en esta etapa fue residuals de la librería estándar.

### **Mapeo de la enfermedad**

Por último, fueron creados mapas de la enfermedad obtenidos a partir de los valores calculados en los pasos anteriores. Estos mapas son de gran importancia, pues representan de forma visual la distribución de la enfermedad y permiten identificar patrones y agregaciones espaciales. Además, son un insumo importante para estratificar la zona objeto de estudio de acuerdo con el nivel de riesgo de prevalencia de la enfermedad.

Se utilizó un mapa de la SMR bajo enfoque clásico, el cual se usó cuando se rechazó el supuesto de que los datos seguían una distribución de Poisson. Para probar esto se estimó la dispersión de la variable del conteo de los casos observados almacenados en la variable NCancer, por el ajuste del GLM, incluyendo solo el intercepto y la población en riesgo almacenada en la variable NPer. En los casos en que se presentó sobredispersión en los datos se rechazó la hipótesis de que los datos seguían una distribución de Poisson y, por lo tanto, se asumió una distribución binomial negativa que permitía tratar varianzas grandes.

Este mapa se grafica utilizando la función embaysmooth, de la librería DCluster del software R.

## Resultados y discusión

### Determinación de la estructura espacial de los modelos

**Tabla 2.** Estadísticas básicas de las variables SMR y NCancer para cada año de estudio

Año	SMR						NCancer					
	Mín.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Máx.	Mín.	1st Qu.	Median	Mean	3rd Qu.	Máx.
2005	0	0	0,6781	1,108	1,677	14,05	0	0	1	4,03	2,75	746
2008	0	0	0,6804	1,047	1,580	17,60	0	0	1	4,03	3,00	793
2012	0	0	0,6013	1,029	1,512	16,94	0	0	1	4,14	2,00	854

*Fuente:* elaboración de los autores.

La importancia de utilizar la SMR para analizar la estructura de dependencia espacial de NCancer para cada año, frente a utilizar sus datos crudos, se observa de forma clara en la tabla 3, donde la variabilidad de los datos se reduce drásticamente después de realizar una adecuada estandarización, lo que permite analizar sin ruido características determinantes en la incidencia de la enfermedad.

En la tabla 4 se presentan los diez criterios de contigüidad utilizados, y se resaltan los que presentaron el menor valor de índice AIC para cada año.

Se destaca el hecho de que la matriz de contigüidad seleccionada para el año 2005 no sea la misma para los años 2008 y 2012. Analizando con detalle los datos de

la BDE, se deduce que eso se debe a que para el 2005 existían cuatro municipios que hacían parte, como corregimientos, de otros municipios de mayor extensión y, por lo tanto, los registros de población y casos de muerte por cáncer gástrico en esos municipios tenían valor de cero.

Con las matrices de contigüidad seleccionadas, a continuación se pasó a definir la matriz de pesos espaciales asociada, en estilo binario, para cada año, que fue la utilizada en los cálculos posteriores.

Se procedió entonces a evaluar si los casos de cáncer gástrico de regiones vecinas eran similares, lo que podría significar la influencia de regiones vecinas entre sí. Esto se efectuó mediante los estadísticos y sus p-valores que se muestran en la tabla 4.

**Tabla 3.** Valor coeficiente AIC para cada criterio de contigüidad

Año	Rook	Queen	Tri	Sph	Gab	VeR	knn1	knn2	knn3	knn4
2005	---	---	-75.15	-659.45	-229.67	-172.05	159.98	-631.37	-615.89	-460.25
2008	---	---	-232.09	-573.07	-235.09	-322.59	-88.20	-705.67	-611.69	-428.99
2012	---	---	-243.89	-514.65	-242.61	-173.77	136.34	-847.26	-481.25	-454.71

*Fuente:* elaboración de los autores.





**Tabla 4.** Pruebas de AEG para la SMR

Año	I de Moran		C de Geary	
	Estadístico	p-valor	Estadístico	p-valor
2005	0,2487	2,20E-16	0,7379	1,38E-05
2008	0,2209	2,463e-16	0,7899	2,48E-02
2012	0,1964	3,52E-10	0,8182	6,90E-02

Fuente: elaboración de los autores.

Para el test de I de Moran la prueba es significativa en cada uno de los 3 años, comprobándose la existencia de una estructura espacial en la distribución de NCancer, además de que, al ser positivo el estadístico, sugiere que en la distribución espacial de casos los municipios con valores altos de SMR estaban rodeados de municipios que presentaban ese mismo comportamiento, y los municipios con tasas muy bajas de SMR tenían como vecinos municipios con valores bajos.

El test de disimilitud de Geary, igualmente sugiere que, para los tres años, los pares de valores vecinos son similares, y de hecho lo son bastante, si se tiene en cuenta el alto valor obtenido por ese estadístico para cada año.

### **Modelización de la variable explicada**

En seguida, se evaluó si habían diferencias entre los diferentes riesgos, lo cual se

hizo mediante las pruebas mostradas en la tabla 5.

Se observa que en la columna de evaluación se obtuvieron valores negativos (lo que implica que el valor del estadístico de contraste es mayor al valor de la distribución de prueba para cada caso), por lo que se concluye que no existe homogeneidad de los riesgos relativos para los valores de NCancer en cada año. Eso implica la existencia de una sobredispersión en los datos, de tal manera que un modelo con la distribución Poisson deja de ser apropiado para explicar a NCancer.

Teniendo en cuenta lo anterior, desde acá se empieza a analizar el fenómeno trabajando con un GLM sin estructura espacial (NCancerNB\_GLM) y un GLMM\_ME con estructura espacial al incluirle los vectores propios de Moran (NCancerNB\_GLMM), cada uno siguiendo una distribución binomial negativa para cada año (2005, 2008 y 2012), tal como se muestra en las tablas 6, 7 y 8.

**Tabla 5.** Pruebas de la homogeneidad de los riesgos relativos

Año	Prueba	Estadístico de contraste	Evaluación estadístico-prueba
	Chi cuadrado	chtest	Chi cuadrado - chtest
2005	1044,270065	2736,025	-1691,754935
2008	1044,270065	2450,255	-1405,984935
2012	1044,270065	2602,564	-1558,293935

Fuente: elaboración de los autores.



**Tabla 6.** Coeficientes y p-valor de las covariables, modelos año 2005

Modelo	NCancer05NB_GLM		NCancer05NB_GLMM	
AIC	3683.7		3606.9	
Variables	p-valor	Estimado	p-valor	Estimado
Intercept	2e-16	-9.641e+00	2e-16	-9.705e+00
NperAfro05	4.97e-05	-8.315e-03	1.32e-06	-9.663e-03
PNbi05	2.34e-08	-1.064e-02	1.09e-11	-1.219e-02
PMun05	4.59e-06	5.048e-03	4.05e-09	6.337e-03
AMsnm	8.96e-15	2.759e-04	3.04e-10	2.186e-04
ME40	....	....	7.07e-05	2.792e+00
ME5	....	....	1.04e-06	5.456e+00
ME3	....	....	0.001224	4.963e+00
ME485	....	....	0.003344	2.832e+00
ME4	....	....	0.000655	-4.160e+00
ME31	....	....	6.09e-06	3.818e+00
ME19	....	....	0.000281	3.673e+00

Fuente: elaboración de los autores.

**Tabla 7.** Coeficientes y p-valor de las covariables, modelos año 2008

Modelo	NCancer08NB_GLM		NCancer08NB_GLMM	
AIC	3573.9		3511.1	
Variables	p-valor	Estimado	p-valor	Estimado
Intercept	2e-16	-1.030e+01	2e-16	-1.033e+01
NperAfro08	0.000105	-7.290e-03	4.41e-05	-7.429e-03
PNbi08	0.000549	-5.830e-03	1.14e-05	-7.029e-03
IDMun08	2.76e-05	1.149e-02	5.42e-06	1.161e-02
PEdu08	0.011670	3.676e-03	0.011719	3.516e-03
PMun08	0.036173	2.047e-03	0.017873	2.189e-03
AMsnm	2e-16	2.774e-04	2e-16	2.745e-04
ME242	....	....	1.708e+00	0.030533
ME9	....	....	-1.712e+00	0.001530
ME53	....	....	2.222e+00	0.000363
ME33	....	....	3.190e+00	3.97e-05
ME13	....	....	2.010e+00	0.000798
ME311	....	....	1.725e+00	0.022017
ME14	....	....	3.338e+00	2.31e-05
ME97	....	....	-3.153e+00	0.005093

Fuente: elaboración de los autores.



**Tabla 8.** Coeficientes y p-valor de las covariables, modelos año 2012

Modelo	NCancer12NB_GLM		NCancer12NB_GLMM	
AIC	3566.2		3539.8	
Variables	p-valor	Estimado	p-valor	Estimado
Intercept	2e-16	-1.047e+01	3.324e-01	-1.061e+01
NperAfro12	0.001970	-5.860e-03	1.820e-03	-5.913e-03
PNbi12	5.61e-07	-9.158e-03	1.770e-03	-9.412e-03
IDMun12	0.000104	1.024e-02	2.544e-03	1.146e-02
PEdu12	0.000193	5.282e-03	1.380e-03	5.417e-03
PMun12	0.027756	2.451e-03	No significativa	No significativa
AMsnm	1.42e-14	2.711e-04	3.435e-05	2.833e-04
ME242	....	....	0.016803	1.954e+00
ME9	....	....	0.000759	-2.082e+00
ME53	....	....	6.69e-05	2.753e+00
ME32	....	....	0.002200	-2.247e+00
ME748	....	....	0.019114	2.055e+00

Fuente: elaboración de los autores.

Las variables resaltadas en azul fueron significativas tanto en el modelo sin estructura espacial como en el que la tiene; sin embargo, no coinciden en los tres años. Aquellas variables resaltadas en verde fueron significativas tanto en el modelo sin estructura espacial como en el que la tiene, y además aparecen en los modelos para los tres años analizados. Se infiere que son las que más influyen en el comportamiento de la variable endógena NCancer.

### Evaluación de los modelos

Se aprecia que el valor del coeficiente AIC disminuyó en los modelos que presentaban estructura espacial, lo que implica que la inclusión del componente espacial es fundamental para explicar el fenómeno del cáncer gástrico en el país.

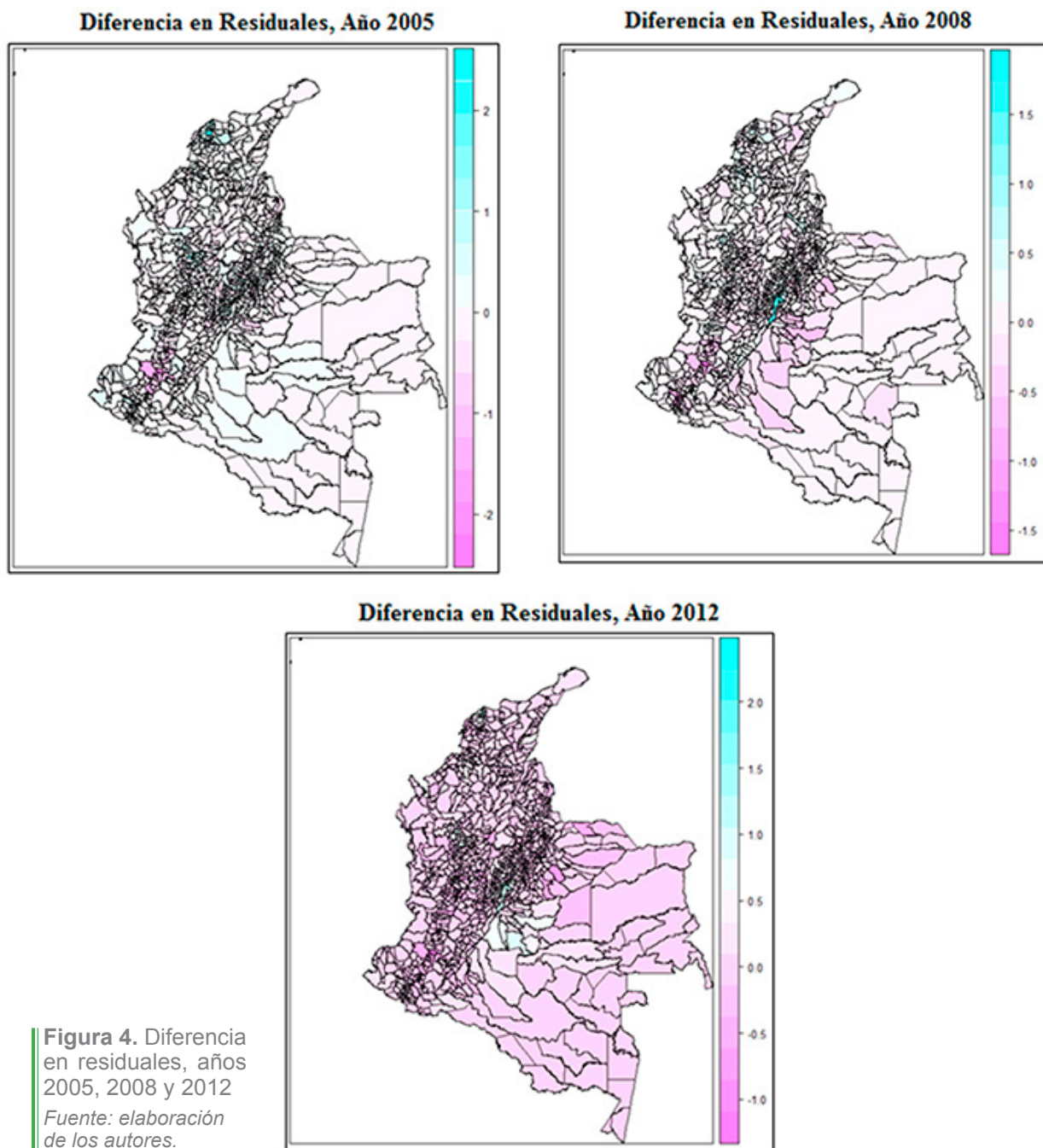
Se observa además que para cada año resultó un número diferente de vectores propios, a pesar de que en el 2008 y el 2012 se utilizó la misma matriz de pesos espaciales. Es importante analizar con detalle esos ME, y una manera fácil y rápida de evaluar sus efectos en la absorción de la dependencia espacial. En la tabla 9 y la figura 4 se muestra la diferencia entre los residuales del modelo con estructura espacial con respecto a los residuales del modelo sin estructura espacial.

**Tabla 9.** Prueba de AEG de los residuales de los modelos analizados

Año	NCancerNB_GLM		NCancerNB_GLMM	
	Estadístico I de Moran	p-valor	Estadístico I de Moran	p-valor
2005	0,1625	2,20E-16	0,0895	4,89E-05
2008	0,2068	3,19E-14	0,1516	2,50E-08
2012	0,1605	3,69E-09	0,1343	7,74E-07

Fuente: elaboración de los autores.





De las gráficas de diferencia de residuales entre modelos (sin y con estructura espacial) para cada año analizado, se destaca la reiterada aparición de municipios del departamento del Cauca y Tolima en los casos de agrupamiento de disminución de residuales, y la aparición de municipios de

Antioquia y Cundinamarca en los casos de agrupamiento de aumento. Todos ellos destacan por el hecho de que los vectores propios de Moran, utilizados como variables representativas, poseían allí valores sobresalientes que provocaban una estructura de dependencia espacial.





Se aprecia que las variables que fueron significativas para los tres años analizados poseen valores similares en sus coeficientes, lo cual ayuda a confirmar que los signos y valores de dichas variables son los apropiados.

Es así como se puede afirmar que la variable PNbi tiene una relación inversa con NCancer para los tres años, algo que fue un poco fuera de lo común si se tiene en cuenta cuál es la cantidad que cuantifica el NBI, habiéndose esperado un valor de coeficiente positivo.

Otra variable importante fue la AMsnm, que además obtuvo un coeficiente positivo, tal como se esperaba, de acuerdo con los patrones de distribución del cáncer en el país.

Finalmente, analizando la variable NperAfro, se deduce la importancia de las variaciones genéticas en la población en cuanto a la explicación del cáncer gástrico, pues, al ser negativo su coeficiente, indica que existen menos probabilidades de morir por cáncer gástrico si se pertenece al grupo étnico de afrodescendientes.

### ***Mapeo de enfermedades***

En la figura 5 se presentan los mapas de la SMR desde el enfoque clásico para los años 2005, 2008 y 2012. De forma global, estos mapas muestran un incremento en la SMR para el periodo 2005-2012, con tasas más altas, y la inclusión de unidades espaciales en los tonos rojizos, que indican alta prevalencia de la enfermedad. Para el 2012, se observa un incremento significativo de riesgo en los municipios de Paz de Ariporo, Cravo Norte, Fortul y

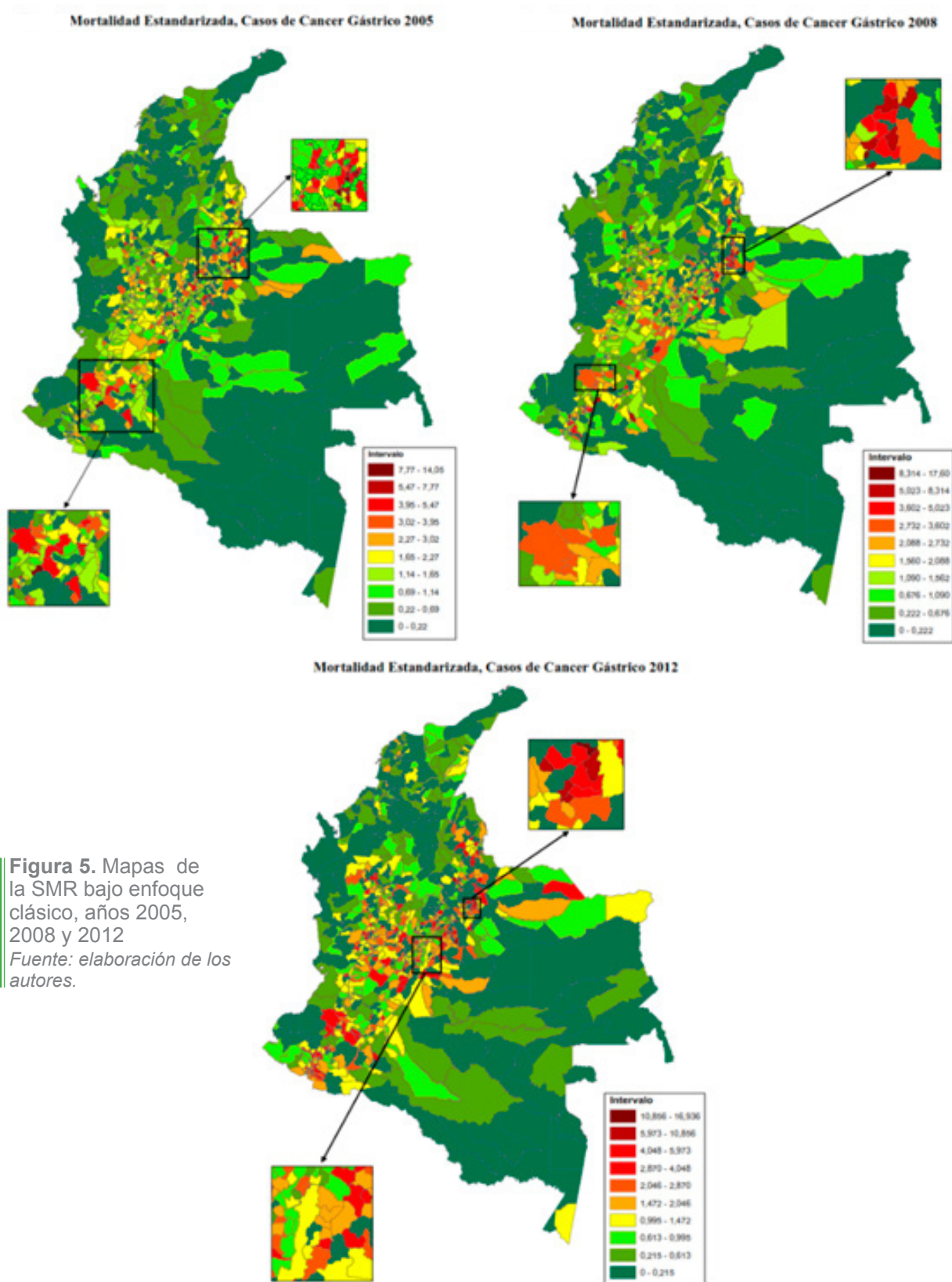
Chiscas, ubicados en el departamento de Arauca y en el norte de Casanare, y además en Potosí, Ipiales y Cumbal, ubicados en el departamento de Nariño,

Para los tres años, se observa un patrón muy diferenciado de alto riesgo de mortalidad por cáncer gástrico en la región andina, especialmente en los municipios aledaños a centros urbanos como Bogotá, Medellín, Cali, Cúcuta e Ibagué. De otro lado, las regiones de la Costa Atlántica, Caribe y Amazonía presentaron bajo riesgo de mortalidad.

### **Conclusiones**

El comportamiento espacial de una enfermedad como el cáncer gástrico no es un fenómeno fácil de estudiar debido a las múltiples limitaciones que tiene, dentro de las que se cuentan los insuficientes registros de casos de ese tipo de enfermedad, los escasos registros de las variables que pueden llegar a explicar ese fenómeno o la dificultad de estudiar esa enfermedad de forma indirecta, como fue el caso del presente estudio.

Sin embargo, los resultados obtenidos con los modelos de regresión se consideran satisfactorios, ya que el valor de dos de los coeficientes de las variables que fueron significativas están en consonancia con las suposiciones previamente formuladas respecto a las posibles causas de la enfermedad. Con ellos es posible respaldar las afirmaciones de que la incidencia del cáncer gástrico está fuertemente relacionada con factores genéticos de la población y con factores físicos del entorno natural, como la altura sobre el nivel del mar.



**Figura 5.** Mapas de la SMR bajo enfoque clásico, años 2005, 2008 y 2012

Fuente: elaboración de los autores.



Es de especial importancia el hallazgo de la relación positiva entre la altura y un mayor número de casos de cáncer gástrico en el país para los tres años de estudio, pues el hecho de que sea un factor que no había sido tenido en cuenta de forma medible por ningún autor en estudios previos permite dar nuevas pistas y variables medibles para cuantificar qué tanto afecta la ubicación geográfica de una persona para la prevalencia de una enfermedad crónica como el cáncer gástrico.

Ahondando en el análisis de los modelos estimados, se observó también que el uso de vectores propios de Moran puede actuar como un método complementario adecuado para el modelado de causas etiológicas, pues, tal como se evidenció, proporcionó un medio para mejorar

la comprensión de la estructura espacial de la variable NCancer y las variables explicativas. De esa manera, también fue útil para evaluar la importancia espacial de factores explicativos no considerados, ya fuese porque eran difíciles de medir o aún se desconocen, sobre todo en aquellos municipios con agrupamientos de disminución (color magenta) o aumento (color cian) de residuales de los modelos.

Definitivamente, la conveniencia del análisis se evidenció mejor a través de la visualización espacial de los datos y resultados por medio de los programas estadísticos y los sistemas de información geográfica, pues permitieron identificar con claridad patrones y agregaciones espaciales como los que se observan en la figura 5.



## Bibliografía

- Bivand, R., Pebesma, E. & Gómez-Rubio, V. (2008). *Applied Spatial Data Analysis with R*. New York: Springer.
- Correa, P. (2011). Gastric cancer: an infectious disease. *Revista Colombiana de Cirugía*, 26(2), 111-117.
- Daza, D. (2012). *Cáncer gástrico en Colombia entre 2000 y 2009*. Bogotá: Universidad del Rosario. Recuperado de <http://repository.urosario.edu.co/handle/10336/4004>.
- Dray, S., Legendre, P. & Peres-Neto, P. (2006). Spatial modelling: a comprehensive framework for principal coordinate analysis of neighbour matrices (PCNM). *Ecological Modelling*, 196(3-4), 483-493. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2006.02.015>.
- Dunteman, G. & Ho, M. (2006). *An Introduction to Generalized Linear Models*. London: SAGE Publications.
- Kaiser, M., Cressie, N. & Lee, J. (2002). Spatial mixture models based on exponential family conditional distributions. *Statistica Sinica*, 12(2), 449-474. Recuperado de <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=9826&context=infopapers>.
- Piñeros, M., Pardo, C., Gamboa, O. & Hernández, G. (2010). *Atlas de mortalidad por cáncer en Colombia*. Bogotá: Instituto Nacional de Cancerología; Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
- Strebel, K., Rolle-Kampczyk, U., Richter, M., Kindler, A., Richter, T. & Schlink, U. (2010). A rigorous small area modelling-study for the *Helicobacter pylori* epidemiology. *Science of the Total Environment*, 408(18), 3931-3942. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2010.03.045.
- Voutilainen, A., Tolppanen, A., Vehviläinen-Julkunen, K. & Sherwood, P. (2014). From spatial ecology to spatial epidemiology: modeling spatial distributions of different cancer types with principal coordinates of neighbor matrices. *Emerging Themes in Epidemiology*, 11(11), 1-10. doi: 10.1186/1742-7622-11-11.
- Waller, L. & Gotway, C. (2004). *Applied Spatial Statistics for Public Health Data*. New Jersey: John Wiley & Sons.





## Normas editoriales

La revista *Análisis Geográficos* es una publicación de carácter científico y divulgativo, con periodicidad semestral, del Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Desde su primer número, publicado en 1982, es uno de los canales institucionales para difundir los avances, los proyectos y las actividades de importancia para la comunidad científica, académica y demás lectores interesados en el análisis y los informes geográficos, cartográficos, de planificación territorial, tecnológicos y de infraestructura y catastro, entre otros. Los objetivos de la publicación son los siguientes:

1. Presentar los resultados de trabajos de investigación del IGAC y de diferentes entidades públicas, privadas, académicas y, en general, de aquellas relacionadas con el sector de la información básica, en su calidad de usuarias y productoras de los datos geoespaciales del país.
2. Difundir los avances en proyectos de innovación y transferencia tecnológica de impacto institucional, con el fin de compartir experiencias y promover la generación de nuevo conocimiento sobre la producción y el acceso a la información geográfica como soporte a la toma de decisiones y el desarrollo sostenible.

La revista *Análisis Geográficos* tratará temas relacionados con las siguientes disciplinas:

- Fotogrametría digital y producción de cartografía básica y temática
- Geodesia y posicionamiento satelital
- Agrología
- Catastro, planificación urbana y regional
- Geografía
- Ordenamiento territorial
- Restitución de tierras
- Aplicaciones de percepción remota
- Gestión de información geográfica
- Infraestructuras de datos espaciales
- Estándares de información geográfica
- Implementación de sistemas de información geográfica, análisis y modelamiento espacial



- Desarrollo de aplicaciones SIG y servicios web
- Gestión ambiental basada en el uso de tecnologías geoespaciales
- Cambio climático
- Nuevas tecnologías y nuevas aplicaciones

Para ser incluidos en la revista *Análisis Geográficos*, los artículos deben cumplir con los siguientes requisitos:

1. El texto debe entregarse en formato digital, en letra Arial, 12 puntos, interlineado a espacio 1,5 y en papel tamaño carta.
2. El número máximo de páginas es 30 para investigaciones científicas y tecnológicas, y 20 para artículos de revisión, reflexión y avances de investigación, incluyendo tablas, figuras, fotografías y bibliografía.
3. El texto debe tener la siguiente estructura:

- **Título:** debe reflejar el contenido en forma clara y concisa y no exceder las 20 palabras.
- **Autor y coautores:** nombres completos, información académica (solo el título más alto obtenido), información laboral actual, institución y correo electrónico.

Si se trata de contenido relacionado con un proyecto, incluir la siguiente información: artículo proveniente del proyecto Título completo, ejecutado en el periodo fecha de inicio-fecha de terminación, inscrito en el grupo de investigación nombre del grupo de nombre de la institución. [Si es un trabajo de grado, se especifica el título obtenido y el director del trabajo].

- **Resumen:** presenta de forma clara los objetivos, los métodos, los resultados más relevantes y las conclusiones. No debe exceder las 250 palabras.
- **Palabras clave:** indican los temas más relevantes que son tratados en el artículo para facilitar su clasificación y divulgación. Para identificar las palabras clave relacionadas con la temática, se sugiere consultar un tesauro como el de la Unesco: <http://skos.um.es/unescothes/view.php?alf=A>.
- **Abstract:** el resumen traducido al inglés es copia fiel, idéntica del español, enunciado por enunciado.
- **Key words:** palabras clave en inglés.



- **Introducción:** debe contener la situación actual del problema, la revisión de los trabajos previos relacionados con este y los objetivos que orientan la investigación.
- **Contenido del artículo:** los artículos que son producto de investigaciones deben incluir en esta sección los siguientes elementos:
  - *Materiales y métodos:* Se deben describir de forma clara y concisa los materiales utilizados en el desarrollo del trabajo, además de las metodologías y procedimientos empleados en el tratamiento de los datos, de tal forma que otros investigadores puedan reproducir los resultados. Para clasificar los temas tratados se deben utilizar subtítulos para separar las secciones, así:

**Título 1** (de la introducción en adelante)

**Subtítulo 2**

**Subtítulo 3**

*Subtítulo 4*

- *Resultados y discusión:* se presentan los resultados siguiendo una secuencia lógica, con el apoyo de tablas y figuras que deben ser fáciles de leer e interpretar y deben citarse siempre en el texto. Las fórmulas y tablas deben insertarse en un formato editable, no como imágenes.

La discusión de resultados debe destacar los aspectos nuevos e importantes del estudio, contrastándolos con los obtenidos en la literatura más actual correspondiente.

Los artículos que tratan sobre revisiones bibliográficas, ensayos, avances de investigación, etc., deben desarrollar los diferentes temas y utilizar subtítulos que permitan su clasificación e identificación.

- *Conclusiones:* en esta sección se mencionan los hallazgos más concluyentes de la investigación, además de un direccionamiento hacia futuras investigaciones.
- *Agradecimientos (opcional):* si se considera necesario, se agradecen aquellas contribuciones determinantes en la concepción, financiación o realización de la investigación.
- *Bibliografía:* listado de fuentes citadas en el texto, que deben ordenarse alfabéticamente. La cantidad mínima sugerida es de 15 referencias. Se



debe utilizar el estándar de normas APA para las citas y referencias bibliográficas:

<http://normasapa.com/como-hacer-referencias-bibliografia-en-normas-apa/>. Los modelos de citación son los siguientes:

**Libros:**

Tao, Y. & Dimitris, P. (2001). *The MV3-Tree: A Spatiotemporal access method for timestamp and interval queries*. New York: McGraw Hill.

**Capítulos de libro:**

Dimitris, P. (2001). The MV3-Tree. En: Tao, Y. (Ed.). *The MV3-Tree: A Spatiotemporal access method for timestamp and interval queries* (pp. 20-25). New York: McGraw Hill.

**Libros electrónicos:**

Tao, Y. & Dimitris, P. (2001). *The MV3-Tree: A Spatiotemporal access method for timestamp and interval queries*. New York: McGraw Hill. Recuperado de <http://www.xxxxxx.xxx>.

**Artículos de revistas y publicaciones periódicas:**

Viqueira, J. R. R., & Lorentzos, N. A. (2007). SQL extension for spatio-temporal data. *The VLDB Journal*, 16(2), 179-200. <https://doi.org/10.1007/s00778-005-0161-9>.

**Ponencias:**

Cook, C. & Thompson, B. (2000). *Nueva cultura de la evaluación: informe preliminar de la encuesta ARL SERVQUAL*. Ponencia presentada en el 66th IFLA Council and General Conference, Jerusalem, Israel, 13-18 de agosto.

**Tesis:**

González, D., Porras, M., Sánchez, L. y Vargas, A. (2000). *Propuesta para la planificación y diseño de bibliotecas infantiles del Sistema de Bibliotecas de la Municipalidad de San José* (tesis de doctorado). Escuela de Bibliotecología y Ciencias de la Información, Universidad de Costa Rica.





- *Bibliografía complementaria (opcional)*: listado de fuentes no citadas en el texto que sirvieron de apoyo documental para el desarrollo del trabajo. Debe cumplir con el estilo solicitado por la revista para la presentación de referencias bibliográficas.
- 4. Cuando se utilizan siglas o abreviaturas, deben escribirse completas la primera vez que se nombren en el texto. Ej.: Organización de las Naciones Unidas (ONU). Si una abreviatura o sigla no se utiliza más de dos veces, es preferible no incluirla en el texto.
- 5. Las fórmulas y ecuaciones deben insertarse en letra Cambria Math 11 (formato predeterminado en Word). La ecuación irá centrada respecto a la columna, con el número de ecuación alineado a la derecha.
- 6. Las figuras (diagramas, dibujos o mapas), las fotografías convencionales y las imágenes de sensores remotos se deben entregar en archivos separados, en formato JPG o TIFF. Deben ir numeradas de forma consecutiva e indicar el nombre y la fuente de la cual fueron tomadas. Si se trata de figuras elaboradas por los autores, indicar que son de “elaboración propia”. La resolución mínima es de 120 dpi y la máxima es de 300 dpi.
- 7. Las tablas se entregarán en formato digital y editable.

Se recomienda a los autores prestar especial atención a la revisión gramatical y ortográfica, así como a la presentación de los artículos.

#### *Otras consideraciones*

- El idioma oficial de la revista es el español.
- Únicamente serán aceptados para su publicación los artículos originales que no hayan sido o estén en proceso de publicarse en otros órganos divulgativos, sin importar cuál sea su idioma.
- Es responsabilidad del autor obtener el permiso escrito para reproducir material que haya aparecido en otras publicaciones o que considere información restringida.
- Las opiniones expresadas en los artículos son responsabilidad exclusiva de los respectivos autores.
- La Oficina Centro de Investigación y Desarrollo en Información Geográfica (CIAF) es la dependencia del IGAC encargada de realizar las convocatorias de artículos




para la revista *Análisis Geográficos*, lo cual no limita la iniciativa de otras áreas e instituciones interesadas en formular sugerencias y propuestas sobre temas relacionados con los objetivos de la misma.

- Cada artículo será sometido a un proceso de evaluación. El Comité Editorial se reserva el derecho de sugerir modificaciones a los artículos y de establecer cuáles serán publicados.
- El Comité Editorial de la revista *Análisis Geográficos* acusará recibo de los originales e informará al autor sobre su aceptación y gestiones para la publicación.

De los artículos aceptados en la revista *Análisis Geográficos*, se entenderá que su autor o autores le ceden a esta los derechos patrimoniales para su publicación en cualquier formato (análogo o digital).





Para conocer otros productos  
y **servicios** del IGAC  
consulte nuestro

**CATÁLOGO DIGITAL**

[www.igac.gov.co](http://www.igac.gov.co)



**Instituto Geográfico Agustín Codazzi - IGAC**

Oficina Sede Central en Bogotá  
Carrera 30 N° 48-51

**Oficinas de atención al ciudadano a nivel nacional**

Conmutador: [571] 3694000 ó 3694100

Línea de atención al cliente: 018000-915570