

# REVISTA **cartográfica**

Número 106 / enero-junio 2023



INSTITUTO PANAMERICANO DE  
GEOGRAFÍA E HISTORIA

**AUTORIDADES DEL  
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA  
2022-2025**

**PRESIDENTE** Dra. Patricia Solís (Estados Unidos)  
**VICEPRESIDENTE** Lic. Rocsanda Pahola Méndez Mata (Guatemala)

**SECRETARIO GENERAL**  
Mtro. Antonio Campuzano Rosales  
México

**COMISIÓN DE CARTOGRAFÍA**

*(Costa Rica)*  
Presidente:  
MSc. Max Lobo Hernández

Vicepresidente:  
MSc. Christian Núñez Solís

**COMISIÓN DE GEOGRAFÍA**

*(Chile)*  
Presidente:  
Dr. Hermann Manríquez Tirado

Vicepresidente:  
Dr. Rodrigo Barriga Vargas

**COMISIÓN DE HISTORIA**

*(República Dominicana)*  
Presidente:  
Dr. Filiberto Cruz Sánchez

Vicepresidente:  
Dra. Reina Cristina Rosario Fernández

**COMISIÓN DE GEOFÍSICA**

*(Ecuador)*  
Presidente:  
Dr. Mario Calixto Ruiz Romero

Vicepresidente:  
Dra. Alexandra Alvarado Cevallos

**MIEMBROS NACIONALES DE LA COMISIÓN DE CARTOGRAFÍA**

Argentina	Agrim. Sergio Rubén Cimbaro
Belice	
Bolivia	Cap. DIM. Saul Ronald Gutierrez Loza Romero
Brasil	
Chile	Dr. Carlos Mena Frau
Colombia	Ing. Pamela Mayorga Ramos
Costa Rica	MSc. Marta Eugenia Aguilar Varela
Ecuador	Mayor Ricardo D. Coyago
El Salvador	Lic. Edwin Denis Hernandez
Estados Unidos	Eric van Praag
Guatemala	Ing. Marcos Osmundo Sutuc Carrillo
Haití	Prof. David Telcy
Honduras	Dilma Doris Ortega
México	Dr. Enrique Muñoz Goncen
Nicaragua	Ing. Noel Ramírez
Panamá	Félix Sánchez
Paraguay	Cnel. SG Ing. Arturo Aquino
Perú	Tcnl. EP Reynaldo Flores Rivero
Rep. Dominicana	Agrim. Rafael Santiago Hernández Batista
Uruguay	Dr. Carlos López
Venezuela	

REVISTA  
**cartográfica**

número 106 • enero-junio 2023



INSTITUTO PANAMERICANO DE  
**GEOGRAFÍA E HISTORIA**

# REVISTA cartográfica

Publicación anual fundada en 1952. Desde 2016 publicación semestral  
Indizada en Latindex, DIAJ y SciELO

Disponible en: PERIÓDICA, Cengage Learning, Ebsco y ProQuest  
<https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/Indexada>

La preparación de la *Revista Cartográfica* está a cargo de la editora  
Dra. María Ester Gonzalez  
Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía  
Universidad de Concepción  
Victoria 486-490, CP 4030000, Concepción, Chile  
Correo electrónico: [editor\\_revista\\_cartografica@ipgh.org](mailto:editor_revista_cartografica@ipgh.org)  
[www.revistasipgh.org/index.php/rcar](http://www.revistasipgh.org/index.php/rcar)

## Comité Editorial

*Dr. Adolfo Quesada-Román*, Universidad de Costa Rica (Costa Rica)  
*Dr. Carlos Granell Canut*, Universidad Jaume I de Castellón (España)  
*Dr. Carlos López Vázquez*, Universidad ORT Uruguay (Uruguay)  
*Dra. Daniela Ballari*, Universidad de Azuay (Ecuador)  
*Dr. Francisco Javier Ariza López*, Universidad de Jaén (España)  
*Dr. Francisco de la Barrera*, Universidad de Concepción (Chile)  
*Dr. Jean Francois Mas*, Universidad Nacional Autónoma de México (México)  
*Dr. Joep Crompvoets*, KU Leuven Public Governance Institute (Bélgica)  
*Dr. Miguel Ángel Bernabé Poveda*, Universidad Nacional de Catamarca (Argentina)  
*Dra. Montserrat Gómez Delgado*, Universidad de Alcalá (España)  
*Dr. Sandra Staller Vázquez*, Universidad Politécnica de Madrid (España)  
*Dr. Theofilos Toulkeridis*, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Ecuador)

Canje, venta y distribución, escribir a:  
Instituto Panamericano de Geografía e Historia  
Secretaría General  
Apartado Postal 18879, C.P. 11870 Ciudad de México, México  
Teléfonos: (52-55)5277-5888, 5277-5791 y 5515-1910  
Correo electrónico: [publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org) | <https://revistasipgh.org/> | <http://www.ipgh.org>

Las opiniones expresadas en notas, informaciones, reseñas y trabajos publicados en la *Revista Cartográfica*, son de la exclusiva responsabilidad de sus respectivos autores. Los originales que aparecen sin firma ni indicación de procedencia son de la Dirección de la Revista.

En cumplimiento con la resolución IX de la XIV Reunión del Consejo Directivo del IPGH (Buenos Aires, Argentina, julio, 1972.), se advierte que: "Los límites que aparecen en los mapas de esta publicación no están, en algunos casos, finalmente determinados y su reproducción no significa aprobación oficial o aceptación por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH)".



**Diseño de portada / Cover design:** Santiago Mora Van Cauwelaert - Taller Siranda.

**Fuente de la imagen / Source:** Reinterpretación vista aérea de La Paz (Bolivia), basada en imagen de satélite Bing (2020) y modelo digital de elevación NASA JPL (2021)

© 2022 Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

*Revista Cartográfica*, núm. 106, enero-junio 2023, publicación semestral editada por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Ex-arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México. Tels. (52-55)5277-5888, 5277-5791, 5515-1910, [www.ipgh.org](http://www.ipgh.org), <https://revistasipgh.org/> | [publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org) | Editora: María Ester Gonzalez, correo electrónico: [editor\\_revista\\_cartografica@ipgh.org](mailto:editor_revista_cartografica@ipgh.org). | Reserva de Derechos al Uso Exclusivo núm. 04-2015-090212390600-203, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor | ISSN (en línea) 2663-3981 | Licitud de título y contenido: en trámite | Responsable de la última actualización de este número: Departamento de Comunicación Social del IPGH, Ex arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México. Última fecha de actualización: 13 de diciembre de 2022.

Se autoriza cualquier reproducción parcial o total de los contenidos o imágenes de la publicación, incluido el almacenamiento electrónico, siempre y cuando sea para usos estrictamente académicos y sin fines de lucro, citando la fuente sin alteración del contenido y otorgando los créditos autorales.

# REVISTA cartográfica

número 106

enero-junio 2023

---

## CONTENIDO

### Artículos

**Diseño y creación de una herramienta geotecnológica para el análisis de la accidentalidad vial en la Ciudad de Toluca, México, SIGESEV-TC**

*Design and creation of a geotechnological tool for the analysis of road accidents in the City of Toluca, Mexico, SIGESEV-TC*

José Miguel Muñoz  
Raquel Hinojosa

7

**Dendrogeomorphology as a tool to depict hydrogeomorphic processes in the tropics**

*La dendrogeomorfología como una herramienta para representar procesos hidrogeomorfológicos en los trópicos*

Adolfo Quesada-Roman

35

**Relaciones entre la estructura urbana y la movilidad cotidiana en Ciudad Juárez, Chihuahua, México**

*Relations between urban structure and daily mobility in Ciudad Juarez, Chihuahua, Mexico*

Isaac Chaparro Hernández

53

**Analyzing Segregation of Informal Residents in Latin American Cities' Periphery Using Remote Sensing**

*Analizando la segregación de los asentamientos informales en la periferia de las ciudades latinoamericanas usando imágenes satelitales*

Sonia Morales

77

**Análisis espaciotemporal del proceso de pérdida forestal en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Michoacán, México**

*Spatio-temporal analysis of the process of forest loss in the municipalities of Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro and Zinapécuaro. Michoacan, Mexico*

Araceli Benítez Franco

99

**Los nuevos corredores en altura en la Ciudad de México.  
Análisis de su proceso, aplicación y visualización en un  
Sistema de Información Geográfica**

*The new corridors in height in Mexico-City. Analysis of its process,  
application and visualization in a Geographic Information System*

Víctor Hugo Aquino Illescas

**125**

**A Cartografia Histórica de Petrópolis e uma análise  
geográfica sincrônica para o século XIX (1846-1861)**

*The Historical Cartography of Petrópolis and a Synchronic  
Geographic Analysis for the 19th Century (1846-1861)*

Tainá Laeta

Manoel do Couto Fernandes

Mário Gonçalves Fernandes

**147**

**Reseñas**

**Ráster con Terra. Esto va de Filas, Columnas, Cotas y Píxeles**

Patricio Lamperein Polo

**171**

**Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento**

Jean-François Mas

**173**

**Definición de la Revista**

**177**

**Normas para Autores**

**178**

# ARTÍCULOS





# Diseño y creación de una herramienta geotecnológica para el análisis de la accidentalidad vial en la Ciudad de Toluca, México, SIGESEV-TC

Design and creation of a geotechnological tool for the analysis of road accidents in the City of Toluca, Mexico, SIGESEV-TC

José Miguel Muñoz<sup>1</sup>

Raquel Hinojosa<sup>2</sup>

*Recibido 8 de agosto de 2022; aceptado 24 de septiembre de 2022*

## RESUMEN

Un sistema de información geográfica (SIG) es un instrumento elemental para la gestión de la seguridad vial. La implementación de metodologías que permita a las unidades de planificación estratégica mejorar, genera que el problema de accidentalidad vial que sufren las ciudades del mundo pueda ser reducido considerablemente a través del análisis de variables físicas, económicas, espaciales y sociales de las metrópolis. Por ello, en este artículo se utilizan herramientas geo informáticas de uso libre que apoyan en esta gestión. La revisión metodológica se materializa en el SIGESEV-TC: un portal geográfico, estadístico y de consulta para la gestión de la seguridad vial en Toluca, la capital del Estado de México, donde es posible almacenar, visualizar y gestionar geográfica y estadísticamente los accidentes de tránsito que han ocurrido en la ciudad. Este proyecto se convierte en el primer SIG de gestión en seguridad vial para la ciudad de Toluca.

*Palabras clave: SIG, seguridad vial, accidentes de tránsito, software libre, geotecnología.*

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, México, correo electrónico: [jmunoz007@alumno.uaemex.mx](mailto:jmunoz007@alumno.uaemex.mx). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1819-7035>

<sup>2</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, México, correo electrónico: [rhinojosar@uaemex.mx](mailto:rhinojosar@uaemex.mx). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6511-0759>

## ABSTRACT

A geographic information system (GIS) is an elementary tool for road safety management. The implementation of methodologies that allow strategic planning units to improve the road accident problem suffered by the world's cities can be considerably reduced through the analysis of physical, economic, spatial and social variables of the metropolis. For this reason, this article uses free geoinformatics tools that support this management. The methodological review is materialized in the SIGESEV-TC: a geographic, statistical and consulting portal for the management of road safety in Toluca, the capital of the State of Mexico, where it is possible to store, visualize and manage geographically and statistically the traffic accidents that have occurred in the city. This project becomes the first road safety management GIS for the city of Toluca.

Key words: *GIS, road safety, traffic accidents, free software, geotechnology.*

## 1. Introducción

Un sistema de transporte es un componente esencial para el desarrollo socioeconómico de cualquier región; incrementa las interconexiones de individuos para aumentar los beneficios en diversos sectores económicos; aporta las bases para la producción con la reducción de gastos, debido a que proporciona fácilmente la adquisición de materia prima, recursos financieros y mano de obra. A nivel social, se promueve la igualdad y el mejoramiento de las condiciones de vida de las personas, posibilitando la unificación de las urbes, generando movilidad y accesibilidad a mayor medida (Zaragoza & Islas, 2017).

Por encima de todas las ventajas que un sistema de transporte ofrece, también conlleva la existencia de dificultades o problemáticas, como los accidentes de tránsito, que pueden ocasionar lesiones, discapacidades, pérdidas económicas, daños socioemocionales y hasta la muerte. Cada año, los choques originados por el tránsito causan la muerte de aproximadamente 1.3 millones de personas y cuestan a la mayoría de los países 3% de su producto interno bruto (PIB); en los países de bajos ingresos se encuentra alrededor de 60% del parque vehicular mundial, pero se producen más de 93% de fallecimientos relacionados con accidentes de tránsito (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021). De acuerdo con las investigaciones realizadas por el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), México es el séptimo país a nivel mundial con muertes en carreteras y el tercero en Latinoamérica, con 22 muertes en personas de 15 a 29 años al día y 24 mil fallecimientos en promedio al año; según la Organización Panamericana de la Salud (OPS), esto genera que 40 mil personas resulten con discapacidad de por vida y más de 750 mil queden gravemente heridas. Debido a este problema de salud pública, el estudio de siniestralidad vial dentro de la administración y planeación de seguridad vial en un departamento de tránsito y movilidad se convierte en una prioridad, con el objetivo de mitigar y prevenir las múltiples muertes y pérdidas económicas que genera un accidente de tránsito (INSP, 2020).

Diversas organizaciones y centros de investigación en el mundo han dedicado sus esfuerzos a estudiar la gestión de seguridad vial a nivel mundial, para implementar metodologías que ayuden a la prevención y reducción de muertes y lesiones que genera un accidente de tránsito. La Norma Internacional ISO 39001, Sistemas de Gestión de la Seguridad Vial, Requisitos y Recomendaciones de Buenas Prácticas afirma que la seguridad vial es un tema de inquietud a nivel mundial, debido a las múltiples muertes que genera un accidente de tránsito. De ahí que esta norma permita a las entidades gubernamentales reducir, prevenir y eliminar la ocurrencia y riesgo de las muertes y heridas en un accidente de tránsito; además, plantea llevar a cabo acciones para tratar los riesgos y oportunidades que aseguran el sistema de seguridad vial, donde se deben de reconocer los factores de desempeño, con el fin de tener información documentada para crear y actualizar los datos de accidentalidad vial, y preservar y disponer con total rigurosidad (ISO, 2012).

La investigación de siniestralidad vial es objeto de análisis en el mundo desde hace más de 20 años. En 2016, Sergio Galán, Elia Quirós y Pedro Rodríguez analizaron las posibles aplicaciones de los sistemas de información geográfica en las carreteras de la comunidad autónoma española de Extremadura con mayor siniestralidad; georreferenciaron los accidentes viales entre 2010 y 2015; relacionaron los eventos con otros tipos de variables visuales que permiten múltiples análisis para el mejoramiento de la seguridad vial en la región, por medio de la generación de mapas de siniestralidad vial, mapa de intensidad media diaria de tráfico, mapa de pendientes-siniestralidad y mapa de IMD-siniestralidad-población. El estudio concluye que junto a la georreferenciación de la accidentalidad y los SIG es posible realizar todo tipo de relaciones para lograr el estudio desde múltiples puntos de vista (Nieto Masot *et al.*, 2016).

En la ciudad de Bogotá D. C. se cuenta con el Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbana Regional (Simur), el cual facilita la comunicación y el intercambio de información entre los peatones, ciclistas, pasajeros y conductores con los componentes de la movilidad (infraestructura, vehículos y empresas). En este sistema es posible visualizar gráficas y mapas de rutas para automóviles, transporte público y conveniente, calidad de servicio y seguridad. Esta herramienta cuenta con un apartado de seguridad vial, donde se encuentra un visor en tiempo real, que se complementa con la plataforma Waze para presentar los accidentes que están ocurriendo en la capital colombiana (Alcaldía Mayor de Bogotá D. C., 2021).

En la ciudad de Medellín existe GeoMedellín- Portal Geográfico del Municipio de Medellín, el cual contiene información de seguridad vial y desarrolla siete temas: salud y seguridad; ordenamiento territorial; movilidad; medio ambiente y hábitat; infraestructura y catastro; educación, cultura y recreación, y desarrollo económico y población. También se encuentran disponibles datos abiertos de fácil descarga, con el uso de los visores geográficos. En materia de seguridad vial, se cuenta con la sección titulada "Caracterización de los incidentes viales

desde el año 2014”, que detalla de manera precisa y eficaz —por medio de tres tableros de control— la información concerniente a los accidentes de tránsito ocurridos en la ciudad, a través de variables como el número de accidentes, de muertos o heridos, gravedad, condición y caracterización de las víctimas, y fecha del suceso (Alcaldía de Medellín, 2021).

En Brasil, Denise Martins Chagas, de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul, propone “Herramientas para el reconocimiento de los factores que causan los accidentes de tráfico: estudio de caso en Brasil” (2014), en el que detalla una forma idónea para la captura de datos, con el objetivo de unificar y relacionar los elementos que interactúan con un accidente de tránsito. Se describe una normalización en la recolección y tratamiento de datos estadísticos que genera la posibilidad de crear mapas de localización de reincidencia en accidentalidad vial, para identificar los “puntos críticos” e implementar medidas para disminuir la siniestralidad en distintas zonas. Los formularios propuestos fueron usados por BHTRANS, agencia responsable de tránsito en la ciudad de Belo Horizonte, Brasil (Chagas, 2014).

En Ciudad de México, en 2007, el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a través de Geotecnología en Infraestructura, Transporte y Sustentabilidad (GITS), genera el “Sistema de Información Geográfica para la atención y prevención de accidentes de tránsito en el Distrito Federal”, que consiste en el diseño y construcción de un SIG de escritorio que integra datos e información entre 2005 y 2007, para el diagnóstico de la seguridad vial en Ciudad de México. Cuenta con ocho líneas de análisis: información básica; marco físico geográfico; marco social; marco económico; proyectos viales; series de accidentalidad municipal; diagnóstico de accidentes de tránsito a escala de intersección vial, y modelos para el análisis espacial de los accidentes. Es uno de los primeros SIG desarrollados para el estudio de la accidentalidad vial en Latinoamérica (GITS, 2020). La unidad GITS cuenta con la línea de investigación en la geografía de la seguridad vial, con enfoques territoriales de múltiples factores y temporalidad para lograr solucionar la problemática de estudio, con el objetivo de mejorar la movilidad en las vías terrestres de México y así evitar pérdidas económicas y humanas que generan los accidentes de tránsito. GITS ha desarrollado las siguientes investigaciones en materia de seguridad vial: diagnóstico de los accidentes de tránsito en el Distrito Federal, 2007; diagnóstico de los accidentes de tránsito en cuatro Zonas Metropolitanas de México, 2008; sistema de información para la atención y prevención de accidentes de tránsito en el Distrito Federal, y Diagnóstico espacial de accidentes de tránsito en el municipio de León Guanajuato 2010-2013 (GITS, 2020). Dichos estudios ponen en evidencia la pertinencia trascendental de sistemas integrados para el manejo de datos de siniestros viales en las urbes, con la finalidad de mejorar la seguridad vial.

Los datos y la información que generan los accidentes de tránsito son registros espaciales, que puntualmente detallan la posición y la información

externa e interna que caracteriza un siniestro vial. Con el objetivo de conservar y actualizar los datos, para planear, gestionar e implementar medidas de aseguramiento y prevención de cualquier problemática en una ciudad, se crearon los sistemas de información geográfica, que, junto con la aplicación de herramientas geotecnológicas, se convierten en poderosos instrumentos para la gestión de la información. Las virtudes atribuidas al transporte por la utilización de los SIG, se vinculan con tres funciones fundamentales: análisis geográfico de la información, despliegue y representación espacial de la misma, e integración de los datos. De esta manera, la particularidad unificadora —vinculada al acopio de información originaria de múltiples fuentes (mapas, documentos, registro automatizado, sensores remotos, etcétera)— facilita la conexión entre series de datos distintas tanto locacionales y temporales, lo cual permite relacionar y estudiar la información determinada en el sector transporte con otra de carácter alterno (social, medioambiental, económica, etcétera), para analizar sus demostraciones territoriales (Backhoff Pohls & Vázquez Paulino, 2002).

El proceso de gestión de la seguridad vial es un aspecto que cada organización encargada de la movilidad de una ciudad debe estudiar exhaustivamente, con el fin de lograr disminuir las pérdidas humanas y económicas que un accidente o siniestro vial produce. Según esto, la ciudad de Toluca, no cuenta con un sistema sólido e integrado para la gestión de la seguridad vial, por lo que los datos que captura la dirección de movilidad no se encuentran en una base de datos robusta, y tampoco se realiza el debido análisis de la información en algún sistema tecnológico (Galicia, 2021). Por ello, en el presente artículo se revisan las metodologías y sistemas geográficos que diversas metrópolis utilizan para la gestión de su seguridad vial, con el objetivo de establecer un conjunto de herramientas geotecnológicas útiles para analizar y visualizar los índices de accidentalidad vial, y de este modo, construir un sistema geográfico, de captura y de almacenamiento de datos, que sirva como mecanismo para la toma de decisiones en la entidad gubernamental correspondiente, para mitigar y prevenir los siniestros viales de la capital del Estado de México, lo que permitirá analizar geográfica y estadísticamente los accidentes viales de los últimos 20 años, para que con esto se pueda estudiar localmente la problemática vial que tiene la ciudad en sus aspectos territoriales, sociales y de infraestructura.

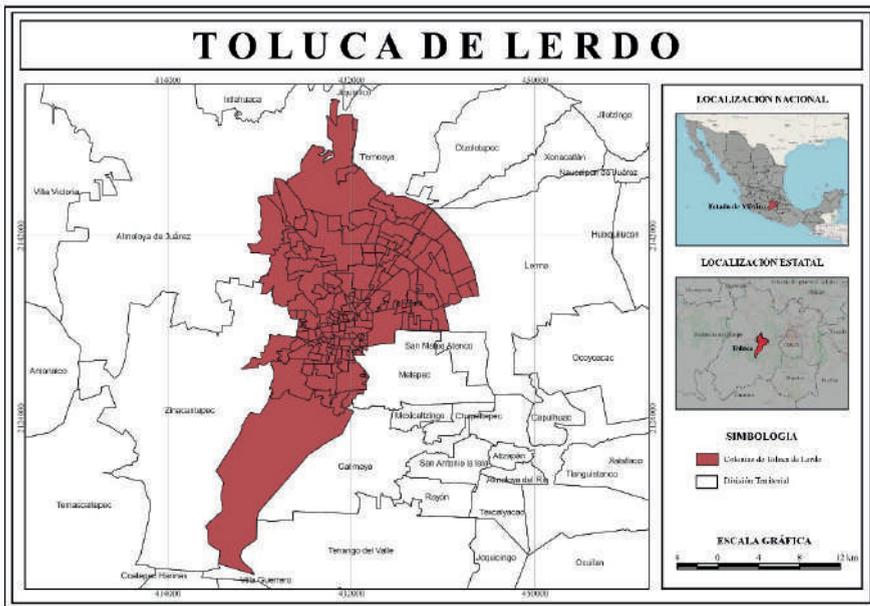
## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1 Zona de estudio**

La capital del Estado de México es la ciudad de Toluca de Lerdo. Ésta se encuentra a 40 km al oeste de la Ciudad de México, con un área total de 420 km<sup>2</sup>. A nivel territorial, el municipio cuenta con 85 circunscripciones territoriales divididas en 47 delegaciones, 38 subdelegaciones y 280 unidades territoriales (Figura 1). Forma parte de la quinta zona metropolitana más importante de la República

mexicana y está incluida dentro de las 364 ciudades del Sistema Nacional Urbano.

En las últimas décadas, Toluca ha vivido un acelerado proceso de metropolización. Su configuración como área metropolitana se inició a partir de los años sesenta gracias a la industrialización del corredor Toluca-Lerma, lo que originó cambios de suprema importancia en las actividades económicas y sociales de la ciudad y, por ende, produjo que municipios vecinos se incorporaran al desarrollo socioeconómico de la creciente metrópolis (Hinojosa, 2017). Para 2020, la población en Toluca es aproximadamente de 910 608 habitantes (51.8% mujeres y 48.2% hombres). En los Estados Unidos Mexicanos existen áreas y zonas productoras, donde se localizan los parques industriales —caracterizados por operar de manera óptima—, las empresas de manufactura y logística. En 2020, Toluca registró ocho parques industriales con Servicios de Alojamiento Temporal y de Preparación de Alimentos y Bebidas (5.167%), comercio al por menor (22.029%), otros servicios excepto actividades gubernamentales (6.865%). Por esta razón, la capital del Estado de México es una de las zonas industriales más importantes del país (SE y Datawheel, 2020).



**Figura 1.** Municipio de Toluca.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).

## 2.2 Datos espaciales

La adquisición de datos es el área primordial para la construcción de una herramienta geotecnológica. Para el presente proyecto, la principal fuente de suministro de información es la del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Las capas espaciales y bases de datos son las más actualizadas y están reproyectadas al sistema WGS84/UTM ZONA 14N y fueron tratadas con herramientas de geoprosesamiento que permiten cortar, disolver, delimitar o unir capas geográficas, según la necesidad de la investigación. Se determinaron los factores que relacionan un accidente de tránsito, pues con el análisis del entorno físico es posible reconocer si el accidente fue generado por la precaria red vial, por la falta de señalización o por objetos que interrumpen el flujo libre de los vehículos. Otro factor importante son las consecuencias que provoca un accidente vial, en un espacio determinado que relaciona áreas socioeconómicas que se pueden ver perjudicadas por un siniestro vial. También, con información poblacional se pueden conocer las tasas de vulnerabilidad demográfica. En la Tabla 1 se visualizan las capas geográficas estrechamente relacionadas con un accidente de tránsito, para identificar su causa o reconocer los elementos espaciales que lo relacionan: accidentalidad vial; infraestructura vial y de transporte; unidades territoriales; demografía y población; topografía, e infraestructura urbana. En esta tabla también se aprecia la fuente de los datos y el grupo al que pertenecen dentro del sistema.

**Tabla 1.** Capas geográficas que componen SIGESEV-TC

<i>Capas geográficas SIGESEV-TC</i>			
<i>Grupo</i>	<i>Capas geográficas</i>	<i>Fuente</i>	<i>Año</i>
1	Accidentalidad vial	Dirección de seguridad vial y de tránsito de la ciudad de Toluca	2000-2019
2	Infraestructura vial y transporte	Red vial	Instituto Mexicano del Transporte
		Restricción peatonal o vehicular	INEGI
		Pasos a desnivel	INEGI
		Vía férrea	INEGI
		Caminos	INEGI
		Glorietas	INEGI
		Puentes	INEGI

<i>Capas geográficas SIGESEV-TC</i>				
<i>Grupo</i>	<i>Capas geográficas</i>	<i>Fuente</i>	<i>Año</i>	
3	Unidades territoriales	Ageb urbana	INEGI	2020
		Ageb rural	INEGI	2020
		Códigos postales	INEGI	2020
		Colonias	INEGI	2021
		Localidades	INEGI	2020
		Manzanas	INEGI	2020
		Usos del suelo	INEGI	2020
4	Demografía y población	Población	INEGI	2020
5	Topografía	Curvas de nivel	CEM	2020
		Pendientes	CEM con procesamiento propio	2020
		Mapa de sombras	CEM con procesamiento propio	2020
6	Infraestructura urbana	Estaciones de policía	Google Maps	2021
		Cementerios	SIPAT	2006
		Venta de alcohol	Google Maps	2021
		Bases de taxis	SIPAT	2006
		Bancos	SIPAT	2006
		Iglesias	SIPAT	2006
		Hospitales	SIPAT	2006
		Estacionamientos	SIPAT	2006
		Escuelas	SIPAT	2006
		Centros comerciales	SIPAT	2006
		Parquímetros	SIPAT	2006
		Mercados	SIPAT	2006
		Áreas de importancia	INEGI	2020
Corrientes de agua	INEGI	2020		

**Fuente:** elaboración propia.

## 2.3 Construcción metodológica

Para la construcción, implementación y diseño del Sistema Integrado de Información Geográfica en Seguridad Vial de la ciudad de Toluca (SIGESEV-TC) es necesario determinar los elementos que se deben considerar para que sea un sistema capaz de gestionar la seguridad vial en una ciudad de manera óptima. Para ello, se realiza una revisión literaria exhaustiva que define los componentes necesarios para la creación de un sistema completo para el estudio de la accidentalidad en una urbe geográfica. En primera medida se tiene la captura, revisión y almacenamiento de datos que, según Denise Martins Chagas (2014), se deben capturar cuando sucede un accidente de tránsito, al igual que la estandarización en su revisión y almacenamiento en una base de datos lo suficientemente robusta y consolidada.

La segunda y tercera parte se determinan por la visualización geográfica y la visualización estadística, elementos que comparte la mayoría de sistemas de gestión en seguridad vial, como el Sistema de Información Geográfica para la atención y prevención de accidentes de tránsito en el Distrito Federal (GITS, 2020), el Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbana Regional (SIMUR), de Bogotá D. C. (Alcaldía Mayor de Bogotá D. C., 2021) y GeoMedellín-Portal Geográfico del Municipio de Medellín (Alcaldía de Medellín, 2021).

El cuarto componente es el sistema de consulta. Emmanuel Galicia, junto con la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), realiza el proyecto denominado "Prototipo de sistema de consulta de accidentes viales para los tomadores de decisiones orientados a la seguridad vial en el ayuntamiento del municipio de Toluca, Estado de México", a través del cual propone un prototipo de consulta de accidentes viales ocurridos entre 2017 y 2019, y está dirigido al departamento de tránsito vial del municipio de Toluca. En este sistema es posible capturar información espacial y características de los sucesos ocurridos, para lograr la integración, almacenamiento y manipulación de los datos espaciales en PostgreSQL, donde se obtiene una herramienta capaz de integrar la información de manera estandarizada, clasificada y categorizada (Galicia, 2021).

Según la anterior revisión de sistemas tecnológicos que grandes ciudades de latinoamérica implementan para la gestión de su seguridad vial, no se determina cual es el mejor debido a que cada una de ellas tienen características específicas que hace un sistema único y particular, por lo que de acuerdo a los objetivos del presente estudio, se definen las cuatro áreas que en común y de suma importancia tienen los sistemas estudiados para la debida gestión de la seguridad vial en una ciudad: (1) Captura, revisión y almacenamiento de datos, (2) visualización geográfica, (3) visualización estadística y (4) sistema de consulta, con la característica fundamental de usar *software libre*, por la autonomía y libertad en la construcción de los componentes del sistema. A continuación se detallan estas áreas de estudio en el desarrollo y creación del Sistema Integrado de Información Geográfica en Seguridad Vial de la Ciudad de Toluca, SIGESEV-TC.

### 2.3.1 Uso de software libre

El término *software libre* se refiere a la autonomía que tienen los usuarios para ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, cambiar y mejorar el *software*. Está determinado por cuatro clases de libertad: libertad de operar el programa sea cual sea el propósito; libertad para estudiar el funcionamiento del programa para adaptarlo a las necesidades del usuario; libertad de redistribuir copias para cooperar en la ayuda a terceros, y libertad para mejorar el programa y compartir los resultados obtenidos. Lo anterior se realiza debido al acceso que el usuario tiene con el código fuente del programa, por lo que se convierte en la herramienta fundamental para lograr manipular el software de manera adecuada (Stallman, 2015).

Al considerar el software libre se detalla que existe la posibilidad de usar un programa sin tener que costear la copia. Los usuarios del *software* libre tienen la libertad de distribuirlo, estudiarlo, modificarlo, ejecutarlo y mejorarlo, con base en una política denominada GNU, que establece los tipos de licencia según los requerimientos que necesita el usuario (Rodríguez-Dueñas, 2014; Stallman, 2015).

Para la presente investigación y elaboración del SIGESEV-TC, se utiliza el *software* libre, por sus múltiples ventajas.

## 2.4 Captura, revisión y almacenamiento de datos

Los accidentes de tránsito ocurren en un espacio determinado de la vialidad de una ciudad, por lo que tienen la connotación geoespacial, es decir, se caracterizan por ser entidades espacio-temporales que contienen: posición relativa: frente a otros elementos del entorno; posición absoluta: sobre un sistema de coordenadas (x, y, z); atributos que lo describen: características del elemento o fenómeno, y figura geométrica que lo representa: punto, línea, polígono (López & Torres, 2015). Estas características permiten considerar los aspectos de calidad que rigen los datos geoespaciales en términos de accesibilidad, integridad, precisión, actualidad y consistencia. Las entidades que suministran la información geoespacial son las encargadas de velar por la calidad y transparencia de los datos que se comparten, y deben cumplir al menos con los estándares establecidos en la ISO 19157 (ISO, 2013) o con los que rige cada organización.

A nivel local, es primordial determinar la información que se va a capturar en un accidente de tránsito según las necesidades de la entidad gubernamental. En la captura de datos se deben considerar cuatro áreas básicas: información espacio-tiempo del accidente, información de los vehículos involucrados, información de las personas involucradas y descripción del accidente (Chagas, 2014). Para llevar a cabo esta tarea se requiere de un equipo especializado; por ejemplo, la elaboración de un formulario debidamente estructurado y legible para cualquier persona que lo va a utilizar en una aplicación móvil. Ésta es una

herramienta diseñada para desarrollar una función específica en una plataforma concreta: móvil, tablet, tv o pc, y proporciona nuevas formas de comunicación e interacción para la obtención de información (Briz-Ponce *et al.*, 2015). Además, permite integrar el formulario que *a priori* se realizó de forma manual, pero con la diferencia de que la app seleccionada pueda capturar coordenadas en tiempo real, ya sea *online* u *offline*, y así conocer las coordenadas geográficas del lugar. Algunas de las aplicaciones gratuitas útiles para cumplir con este objetivo son gvSIG Mobile, KoboToolBox, Open Data Kit (ODK), CartoDruid y Qgis, con la extensión de QField. Para el presente sistema se usa KoboToolBox, pues permite la edición del formulario con XLSForm o diseñar un formulario de manera estructural, que sea capaz de capturar la información del accidente de tránsito y los elementos que interactúan con éste, es decir, víctimas, vehículos y contexto espacial de manera relacional.

Después de que los datos son capturados, descargados, revisados, depurados y organizados hay que almacenarlos en un sistema gestor de bases de datos (SGBD), que cumple tres requisitos básicos: no redundancia: datos almacenados una sola vez; independencia: los datos se organizan de una manera estructurada, y concurrencia: varios usuarios pueden acceder simultáneamente a los datos (RIPOLL, 2008). El modelo más utilizado es la base de datos relacional, el cual consiste en un conjunto de tablas formadas por filas (registros) y columnas (campos), y comparten algún campo entre ellas, que sirve para establecer relaciones y generar consultas complejas (Alonso Sarria, 2014). Algunos de los softwares libres de SGBD son: PostgreSQL, MySQL y SQLite. En este proyecto se usa PostgreSQL, por su robustez, confiabilidad y rendimiento.

Luego de conocer la forma de captura de datos y su estructura en un SGBD, los datos se convierten en información y conocimiento por medio de la visualización geográfica y estadística, y así se estudian los patrones de ocurrencia de la siniestralidad vial de la ciudad.

## 2.5 Visualización geográfica

El desarrollo de las tecnologías de la información tiene una importante influencia en la cartografía, contribuyen al surgimiento de modelos de comunicación geográfica de nuevo aprendizaje. La visualización geográfica es uno de los paradigmas que, con el uso de nuevas tecnologías, amplían la importancia de los mapas como herramienta poderosa de comprensión de los fenómenos espaciales (Bosque Sendra & Zamora Ludovic, 2002). La parte fundamental de la visualización geográfica es el aplicativo cliente-servidor que hace posible navegar sobre datos continuos y tridimensionales del territorio, para realizar consultas y explotación de los datos espaciales (Galileo Ingeniería y Servicios, 2011). La representación de un análisis en un espacio SIG, las bases de datos de calidad y el estudio de indicadores conllevan al reconocimiento de modelos territoriales, socioeconómicos y geodemográficos, que no son identificables fácilmente con información estadística; de ahí la importancia de representar

la información espacial para la gestión urbana y territorial. Utilizar variables geográficas adecuadas ayuda a transmitir e identificar con éxito la problemática de estudio en un espacio determinado (Postigo *et al.*, 2013).

Trabajar con herramientas geográficas que propician el desarrollo de nuevas iniciativas, ideas y proyectos, para la evaluación de relaciones en los protagonistas de un sistema urbano, hace que a través de un geovisualizador, junto a variables socioeconómicas y ambientales, se tenga acceso a los importantes cambios y patrones que las municipalidades puedan identificar para elaborar y diagnosticar políticas y planes que optimicen la problemática en cuestión (Postigo *et al.*, 2013). Los visualizadores libres de más relevancia y útiles para la realización de este tipo de cartografía en una zona determinada son: gvSIG Online, Carto, GeoRED e Instamos. Aquí se optó por el gvSIG Online, porque se puede activar un campo temporal que facilita la visualización de los accidentes de tránsito en series animadas de tiempo; asimismo, junto con la edición cartográfica a partir de código SLD, se generan mapas de calor que optimizan el análisis de este fenómeno.

## 2.6 Visualización estadística

La visualización estadística está dada por el uso de *dashboards* digitales, herramienta que reconoce y establece los indicadores claves para analizar los factores más importantes en la toma de medidas y decisiones, que permitan obtener resultados óptimos en pro de asegurar un buen desarrollo (Calle Paz & Valles Coral, 2021). Un *dashboard* es una herramienta que representa visualmente la información más relevante y necesaria de manera organizada y consolidada para el cumplimiento de los objetivos propuestos. Su función principal es diagnosticar de manera óptima un problema, para agilizar la toma de decisiones, mediante la evaluación y seguimiento periódico de indicadores y patrones que facilitan a las entidades públicas y privadas analizar el entorno real de su espacio (Morales, 2021).

Los elementos generales de un *dashboard* son fundamentales para la elaboración de un buen producto. Primero se tiene el reporte, que muestra la información clave para el diagnóstico, de esta manera la temporalidad que da a conocer el periodo de toma de la información. Segundo, la apertura muestra la forma en que se despliegan los contenidos para la clasificación de la información, para ello se debe tener en cuenta la frecuencia de actualización, ya sea diaria, semanal o mensual. Tercero, los gráficos son los elementos más importantes, porque son la visualización gráfica de los indicadores (diagramas de barras, pastel o líneas) (Robalino, 2017). Las aplicaciones gratuitas más usadas para la elaboración de *dashboards* son: Google DataStudio, Tableau Public y Dashboards de QGIS. En este proyecto se emplea Tableau Public, por su facilidad de manejo y edición; además, favorece la conexión con PostgreSQL, por lo que la base de datos generada sirve a Tableau para mantener el *dashboard* actualizado.

## 2.7 Sistema de consulta

La información que es capturada y visualizada geográfica y estadísticamente es primordial que se pueda consultar y descargar para la elaboración de análisis externos al sistema. Existe la plataforma útil para la consulta de una base de datos web, cuya funcionalidad es establecer interacción entre personas que investigan información del tema relacionado (Falgueras, 2014). Este sistema se realiza por medio de una página de consulta, cuyo objetivo es recuperar la información almacenada en la base de datos. Se recomienda proporcionar al usuario los diferentes tipos de búsqueda, que van desde una consulta simple o básica, avanzada o combinada, hasta la consulta de los índices y el acceso por categoría temática. Los elementos básicos para esta página de consulta radican en la identificación y especificación de la base de datos, la acotación de la búsqueda a un campo o conjunto de ellos, la visualización de los índices, información breve para ayudar en la consulta, la elección de la forma de presentación de los resultados y del ordenamiento de los datos, botones para la ejecución de acciones, un historial de búsquedas, navegación entre páginas de interfaz, y datos que identifiquen y filtren la información por fecha, hora y tipología. Los resultados son una lista que contiene la información solicitada para presentar al usuario una visión global de lo que desea encontrar en el sistema (Falgueras, 2014).

## 2.8 Herramientas auxiliares para el procesamiento de datos

Los datos capturados en un accidente de tránsito son localizables, de ahí la importancia de proporcionar una base de datos rápida y potente para realizar consultas espaciales y alfanuméricas. Esta labor la cumple PostGIS, donde los datos espaciales se cargan mediante el uso de asistentes gráficos incluidos en la aplicación, para su posterior visualización en un software GIS de escritorio o remoto. De esta manera es útil la interfaz web de Geo Server, un servidor de mapas que provee acceso a fuentes de datos SIG y mapas cartográficos de calidad mediante estándares web (Sánchez *et al.*, 2013). Por medio de estas dos herramientas es posible la conexión interactiva con el visualizador geográfico, lo que facilita y automatiza la carga de información a la base de datos, para que los mapas se actualicen periódicamente de forma rápida y oportuna.

Es fundamental evaluar las herramientas complementarias para el tratamiento de los datos capturados en campo, y de esta manera lograr la interacción y conexión segura con todos los servicios que ofrece el sistema. Si es el caso, es vital desarrollar macros que automaticen los procedimientos que repetitivamente se realizan, con el fin de que la información se encuentre organizada y apta para facilitar la carga a la base de datos correspondiente.

## 2.9 Implementación y unión del sistema

El sistema debe contar con una arquitectura tecnológica, para definir la estructura, comportamiento, gobernabilidad y relaciones entre el software,

hardware, datos, redes, ecosistema e interacción humana que rodea los distintos procesos de negocios. Es posible visualizar esta representación por las capas de información que contiene el entorno tecnológico que se desarrolla (Thompson, 2016). Los requerimientos del sistema se conocen como funcionales y no funcionales. Los funcionales declaran los servicios que presta el sistema y la forma en que éste reacciona ante determinados insumos (define la interacción con otros elementos informáticos, las respuestas automáticas y los procesos predefinidos). Los no funcionales caracterizan lo que el sistema no debe realizar (determina las propiedades del sistema en su rendimiento, seguridad y disponibilidad) y definen las restricciones del sistema y la representación de los datos utilizados en su interfaz, los cuales se generan por la necesidad del usuario debido a la interoperación con otros sistemas de software o por factores de seguridad y privacidad (Wong Durand, 2017).

El servicio Word Wide Web es un sistema distribuido por internet basado en la tecnología hipertexto/hipermedia, que proporciona una interface común a los distintos formatos de datos (texto, gráficos, video, audio) y a los servicios de internet existentes (UM, 2011). El diseño de la página web debe estar determinado por cada uno de sus requerimientos y emplear el lenguaje HTML, CSS y JavaScript para definir su contenido.

Tanto la aplicación móvil de captura de datos, como la visualización estadística-geográfica, el sistema de consulta y elaboración de la implementación y unión del sistema se pueden realizar con el uso avanzado y exhaustivo de la programación. También es posible crear el sistema empleando código útil para la elaboración de los cuatro grandes componentes que se proponen tener en esta herramienta de gestión en seguridad vial (Figura 2).

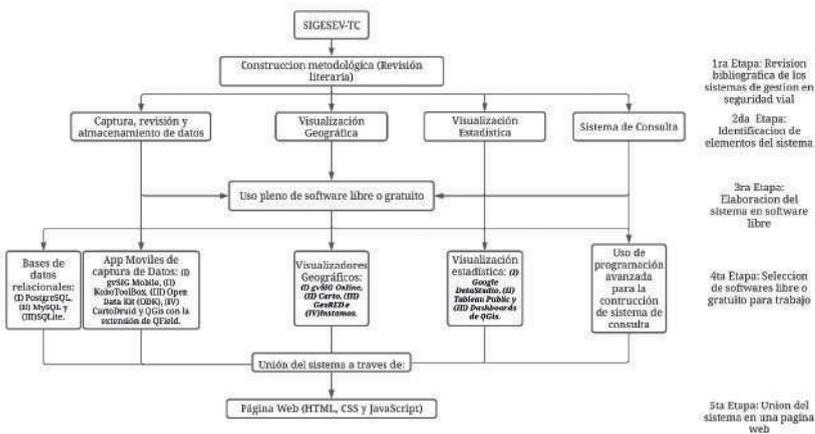


Figura 2. Esquema sintético de la metodología descrita.

Fuente: elaboración propia

### 3. Resultados

La puesta en marcha de la metodología se revisa con la elaboración y estructuración del SIGESEV-TC, el cual cumple con los cuatro parámetros señalados y que se puede visualizar en el siguiente enlace: <http://sigesev-tc.online/>.

#### 3.1 SIGESEV-TC

El Sistema Integrado de Información Geográfica para la Seguridad Vial de la Ciudad de Toluca: SIGESEV-TC (Figura 3) es un portal espacial, estadístico y de consulta para la gestión de la seguridad vial en la capital del Estado de México. Posibilita la gestión, almacenamiento y visualización geográfica de accidentes de tráfico que han ocurrido en esta zona urbana en los últimos 20 años. Contiene tres apartados: análisis multitemporal, SIGESEV-TC: estadística y SIGESEV-TC: geográfico.



**Figura 3.** Entrada principal a SIGESEV-TC.

Fuente: elaboración propia

##### 3.1.1 Análisis multitemporal

Se divide en dos secciones: la primera presenta toda la visualización estadística implementada en Tableau Public (Figura 4) y la segunda combina series temporales animadas de mapas de calor (Figura 5), las cuales se desarrollan en gvSIG Online, donde es posible visualizar el cambio que se produce cada año según el tipo de accidente y muerte por el siniestro.

Para efectos de este proyecto se cuenta con datos de accidentes de tránsito del 2000 al 2019. Gracias a Tableau Public se puede relacionar y visualizar diferentes factores relacionados con un accidente vial, como la ubicación geográfica, fecha y hora de ocurrencia, elementos físicos que intervienen en la

generación de un siniestro vial, la gravedad, la tasa de mortalidad del evento y la cuantía de los daños humanos y materiales causados por los accidentes de tránsito. Este *dashboard* contiene gráficos de barras, diagramas de dispersión, histogramas, tablas y un mapa interactivo que permite la visualización geográfica de los eventos ocurridos en la infraestructura vial.

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL: SIGESEV-TC**

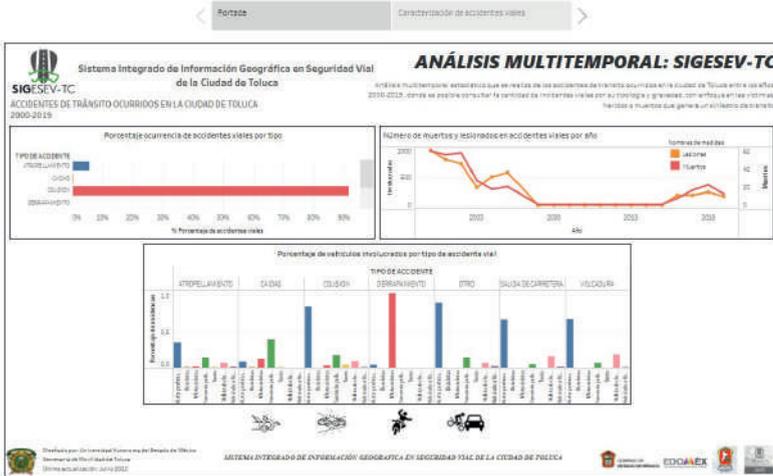


Figura 4. SIGESEV-TC AM – estadísticas / portada.

Fuente: SIGESEV-TC.

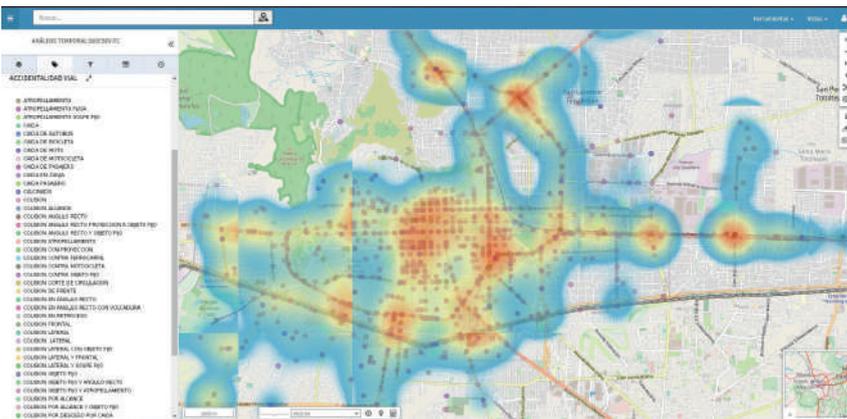


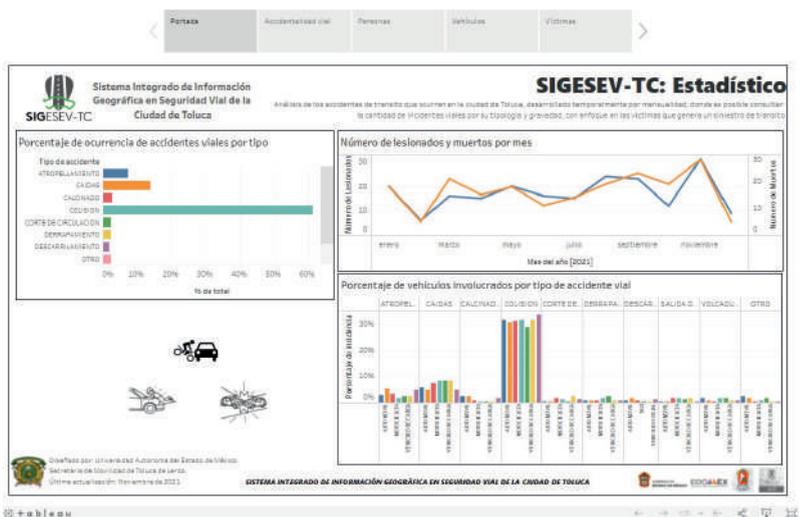
Figura 5. SIGESEV-TC AM - visualizador geográfico. Se visualizan los accidentes que han ocurrido en los últimos 20 años en la ciudad de Toluca.

Fuente: SIGESEV-TC.

### 3.1.2 SIGESEV-TC: estadística

En el primer apartado, denominado “Portada” (Figura 6), se muestra un resumen de índices de siniestralidad en carretera por tipo, el número de heridos y muertos al mes y la tasa de vehículos implicados por tipo de siniestro. El segundo apartado, “Accidentalidad vial”, analiza la fatalidad del accidente y el tipo de evento, se ubica geográficamente, la ocurrencia del siniestro por colonia y por el tipo de superficie. En el tercer apartado, “Personas”, se estudian los factores humanos que intervienen en los accidentes de tránsito, la relación entre las víctimas y el tipo de accidente, el número de víctimas por tipo de lesión, por edad y sexo, por tipo de accidente y, finalmente, el número de heridos y muertos por tipo de accidente. El cuarto apartado se titula “Vehículos” y analiza numéricamente los vehículos involucrados por tipo (automóvil, autobús, bicicleta, vehículo oficial, motocicleta), el número de vehículos por tipo de accidente, número de vehículos involucrados por modelo y daños por tipo de accidente automovilístico. La quinta y última parte se denomina “Víctimas” y desglosa detalladamente las víctimas por grupo de edad, por la función que cumplen en el accidente vial y una matriz por día y hora del incidente de la víctima. Los anteriores apartados se visualizan de manera mensual, por lo que al activar la herramienta de series de tiempo, discrimina los accidentes de tránsito según su fecha de ocurrencia.

La información contenida en esta área corresponde a los nuevos datos capturados a partir del formulario propuesto, que se detalla en la sección 3.1.5 de este documento.

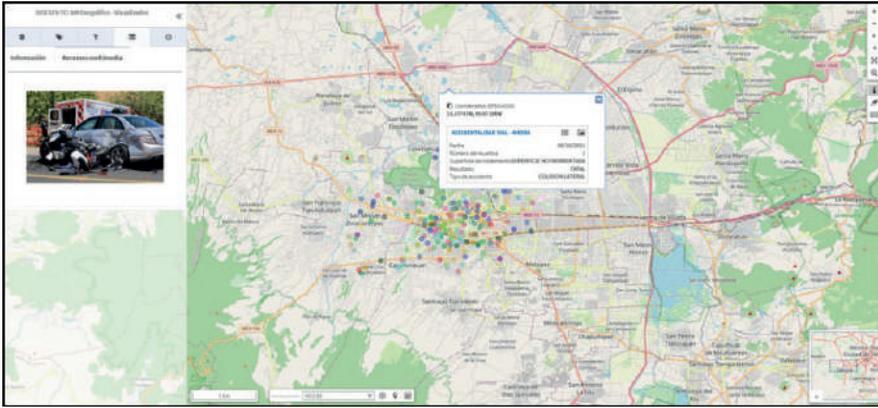


**Figura 6.** SIGESEV-TC: estadística / portada. Es posible visualizar las cinco categorías del sistema estadístico.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos capturados con el formulario implementado en KoboCollect.

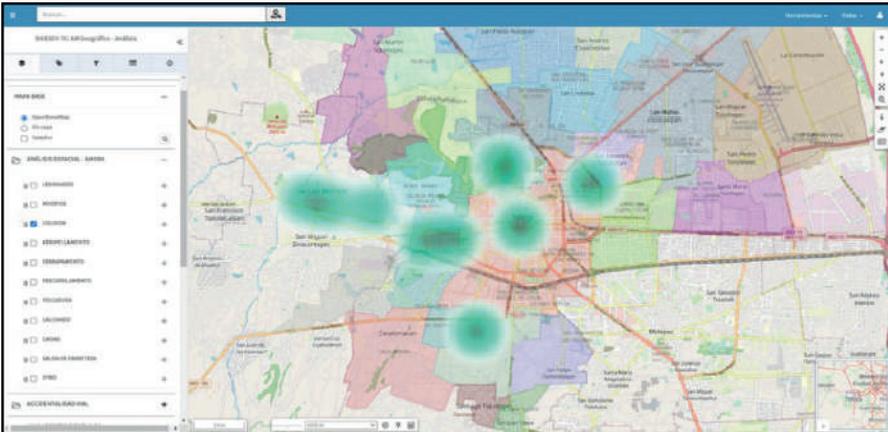
### 3.1.3 SIGESEV-TC: Geográfico

En esta sección se aprecia la ubicación geográfica del accidente vial (Figura 7); además, el contenido dinámico de imágenes hace posible visualizar la magnitud del accidente y los implicados materiales que participan en el siniestro vial. En este apartado se puede relacionar, al igual que con la parte multitemporal, los aspectos socioeconómicos, demográficos, infraestructurales y topográficos del



**Figura 7.** SIGESEV-TC: geográfico / visualizador accidentalidad.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos capturados con el formulario implementado en KoboCollect.



**Figura 8.** SIGESEV-TC: geográfico. Mapas de calor, se identifican los puntos calientes donde suceden los siniestros de tránsito en la ciudad, con el reconocimiento de la tipología y la temporalidad mensual del suceso.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos capturados con el formulario implementado en Kobo Collect.

lugar, con la diferencia de que aquí se aprecia una fotografía del accidente de tránsito, para conocer la gravedad del percance. De esta forma, es posible analizar los diferentes tipos de accidentes que ocurren mensualmente en la capital del Estado de México. Asimismo, gracias a la metodología de superposición de capas es posible el análisis espacial de un accidente de tránsito. En esta sección se analizan los accidentes viales por la densidad espacial de sucesos; también, por el tipo de siniestro se reconoce la influencia de accidentes que ocurren en un lugar determinado. A diferencia de los anteriores mapas de calor (Figura 8), este visualizador se destaca por su temporalidad, pues el análisis se hace cada mes, mientras que el multitemporal se hace anualmente. A partir de la nueva metodología propuesta para la captura de datos se muestra mayor información para analizar.

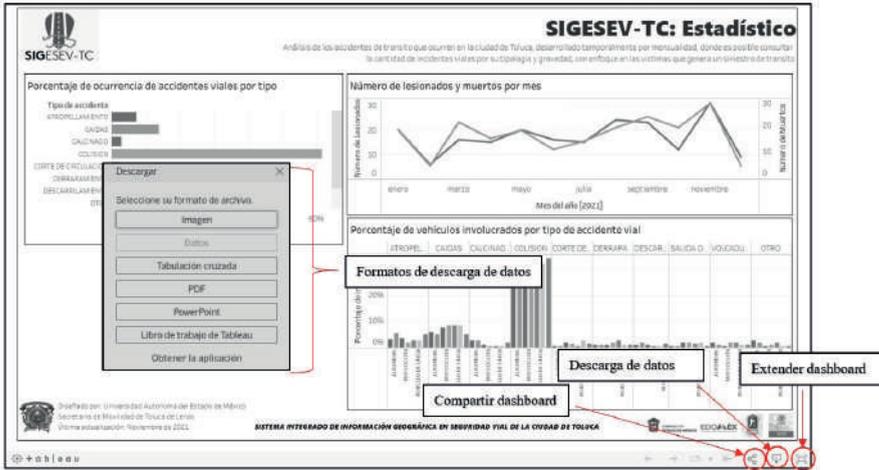
### 3.1.4 SIGESEV-TC: consulta

Para las secciones mencionadas, es posible la consulta y descarga de la información geográfica que contiene los visualizadores y los dashboard. Para los visualizadores geográficos existe la tabla de atributos, cuya información consultada se puede descargar en los formatos CSV, XLSX y PDF. La opción de filtros permite la búsqueda y clasificación de la información de interés; por ejemplo, en la interfaz del visualizador de cada capa se despliega el menú de opciones, que también es posible descargarla en formato Shapefile (Figura 9).



**Figura 9.** SIGESEV-TC: geográfico. Descarga de datos a partir de la tabla de atributos. Fuente: elaboración propia a partir de la visualización en gvSIG Online.

De esta manera, en cada uno de los dashboard es posible descargar la información visualizada en el sistema, en formato imagen, tabulación cruzada, pdf, PowerPoint o en libro de trabajo de Tableau (Figura 10).



**Figura 10.** SIGESEV-TC: estadística. Descarga de datos a partir de la visualización de dashboards. Fuente: elaboración propia a partir de la visualización en Tableau Public.

### 3.1.5 GEAV-TC

La Gestión de Atención del Accidente Vial de la ciudad de Toluca (GEAV-TC) tiene como objetivo principal llevar a cabo la consolidación, integración y actualización continua de la base de datos de siniestralidad vial almacenada en el SIGESEV-TC. Igualmente, modifica el formulario que la Dirección de seguridad vial y de tránsito de la ciudad de Toluca usa para la captura de información, con el fin de concentrar más datos para el análisis exhaustivo del fenómeno de la accidentalidad vial, como la caracterización del accidente vial, las personas, las víctimas y los vehículos implicados.

Gracias a KoboToolBox es posible integrar y recolectar datos de los accidentes viales que ocurren en la ciudad de Toluca y conocer la información espacio-temporal del siniestro de tránsito, información de los vehículos involucrados, datos sobre las personas implicadas e información sobre la atención médica. Los datos capturados se visualizan en SIGESEV-TC: geográfico y SIGESEV-TC: estadístico, para actualizar mensualmente la siniestralidad vial de la capital de la entidad. En el formulario se contemplan distintas áreas (Figura 11). En el primer apartado se considera la hora y fecha del suceso, la zona donde ocurrió el siniestro (colonia, localidad o código postal), para ello son obligatorias las coordenadas geográficas; igualmente, es importante detallar las condiciones meteorológicas y de la infraestructura vial, para determinar posibles causas. En el segundo apartado se toma en cuenta la cantidad de vehículos involucrados, tipo y marca, y los daños que sufrieron en el siniestro. El tercer apartado tiene en cuenta cada una de las víctimas del suceso, por lo que se deben concentrar sus datos como edad, género y la función que cumple dentro del accidente

(peatón, ciclista, motociclista, conductor, pasajero o acompañante); finalmente se reconoce el tipo de lesión.

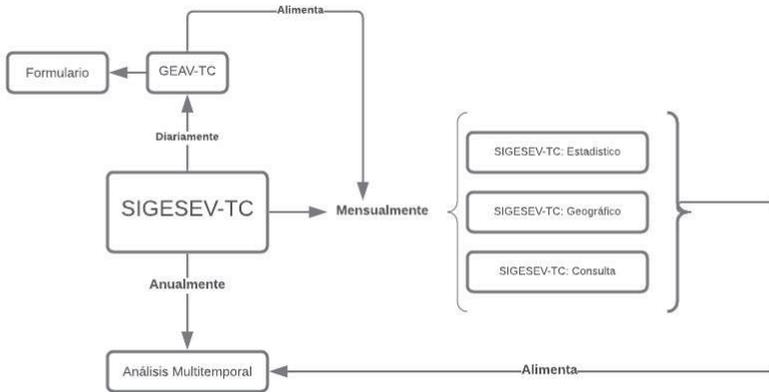
**Figura 11.** GEAV-TC. Formulario desarrollado en KoboToolBox para migrarlo a la aplicación móvil de KoboCollect. Fuente: elaboración propia con base en Chagas (2014).

### 3.2 Diseño de página web

SIGESEV-TC cuenta con una arquitectura cliente-servidor, en la que es posible la interacción intuitiva con el usuario. El presente proyecto contiene una arquitectura en tres capas: la primera está dada por la presentación que se pone en funcionamiento con HTML, CSS y JavaScript; la segunda, con la capa de negocios, y la tercera, con la capa de datos. Los usuarios que van a utilizar SIGESEV-TC se dividen en dos: el usuario y administrador, quienes pueden interactuar y analizar la información presente en el sistema integrado de información geográfica, a partir de diversos requerimientos funcionales: contiene un manual que permite al usuario conocer el sistema para su rápida familiarización; es posible el vínculo a las páginas web del área de movilidad del Estado de México y del ayuntamiento de Toluca; permite la visualización de los datos geográficos y estadísticos que relacionan los accidentes viales que sucedieron en los últimos 20 años; al usuario sólo se le permite la visualización de los datos geográficos y estadísticos, mientras que el administrador puede manipular y editar los datos; se cuenta también con el servidor de correo, donde cualquier usuario puede enviar sus mensajes, y, por último, es posible descargar las capas geográficas en el formato Shapefile para cualquier cliente del SIGESEV-TC.

### 3.3 Funcionamiento de SIGESEV-TC

SIGESEV-TC también es una herramienta de actualización y almacenamiento de los datos que se capturan periódicamente (Figura 12). Se tiene información de los accidentes ocurridos en los últimos 20 años, que corresponde al análisis multitemporal. La nueva propuesta de la GEAV-TC y su formulario recolectan datos de cada siniestro, lo que se convierte en el insumo principal para alimentar a los elementos que conforman al SIGESEV-TC; por esta razón, cada vez que se ingresa información sobre un accidente vial queda registrado en la base de datos de PostgreSQL, para que los administradores, mensualmente, puedan generar estadísticas y mapas de la siniestralidad vial.



**Figura 12.** Flujograma del funcionamiento de SIGESEV-TC.

Fuente: elaboración propia.

## 4. Discusión de resultados

SIGESEV-TC es una herramienta fundamental para realizar análisis estadísticos y geográficos de la siniestralidad vial que sufre la capital del Estado de México. *El propósito esencial de este proyecto no es el análisis, sino poner a disposición la información de los siniestros viales para los diferentes usuarios que la requieran.* A continuación, se hace un *pequeño* análisis descriptivo que se puede realizar con el uso de esta herramienta geotecnológica de la incidencia de accidentes de tránsito durante el periodo 2016-2018. No se realiza un análisis de toda la base de datos geográfica debido a que según los objetivos del presente estudio, no es el análisis de la información, sino la presentación metodológica de la creación y el diseño de SIGESEV-TC.

#### 4.1 Análisis multitemporal

Se examina la incidencia de siniestros de tránsito en el periodo 2016-2018, lo que permite analizar y comparar si existe una disminución considerable de la accidentalidad vial en la ciudad. Los meses de mayor riesgo son marzo y octubre y los meses de menor incidencia son julio y diciembre. Al mes se presentan 180 siniestros en la capital, es decir, cinco diarios.

**Tabla 2.** Accidentes ocurridos por mes en el periodo 2016-2018 en la Ciudad de Toluca

<i>Mes/Año</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>Total</i>
Enero	173	203	163	539
Febrero	150	184	188	522
Marzo	157	244	194	595
Abril	169	202	178	549
Mayo	146	203	178	527
Junio	156	195	182	533
Julio	129	165	161	455
Agosto	184	188	188	560
Septiembre	197	190	164	551
Octubre	200	207	175	582
Noviembre	168	218	186	572
Diciembre	157	182	147	486
<i>Total</i>	<i>1986</i>	<i>2381</i>	<i>2104</i>	
Promedio anual	165	198	175	
Accidentes por día	5	6	5	

**Fuente:** elaboración propia, con datos de la Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del Municipio de Toluca

En la Tabla 3 se registran 2,157 siniestros de tránsito en promedio al año, de los cuales hay 42 lesionados y 23 muertos. Esto significa que por cada 51 accidentes hay un lesionado y por cada 94, un muerto.

El análisis de la accidentalidad vial se reconoce también por la tipología del siniestro vial. La Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del municipio de Toluca reconoce: colisión, atropellamiento, caída, volcadura, derrapamiento y salida de carretera. Según la tabla 4, el mayor tipo de accidente es la colisión y el atropellamiento, con un promedio al año de 2 052 y 75, respectivamente.

El análisis de la accidentalidad vial se reconoce también por la tipología del siniestro vial. La Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del municipio de Toluca reconoce: colisión, atropellamiento, caída, volcadura, derrapamiento y salida

**Tabla 3.** Relación de Lesionados y muertos vs al número de accidentes ocurridos en la ciudad de Toluca

<i>Año/daño</i>	<i>Lesiones</i>	<i>Muertos</i>	<i>Núm. de accidentes</i>
2016	41	17	1986
2017	41	20	2381
2018	45	32	2104
Total	127	69	6471
Promedio	42	23	2157

**Fuente:** elaboración propia, con datos de la Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del Municipio de Toluca.

**Tabla 4.** Ocurrencia de siniestros de tránsito por tipología 2016-2018

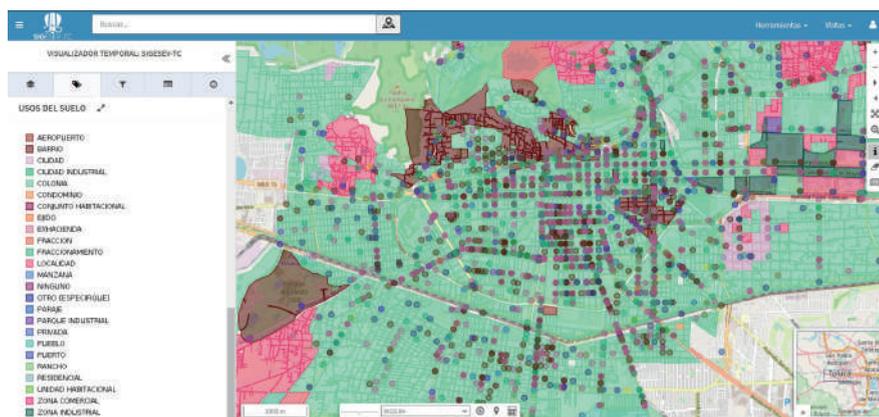
<i>Tipo ACC/año</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>Promedio anual</i>
Colisión	1887	2307	1962	2052
Atropellamiento	80	49	98	75
Caídas	9	17	22	16
Volcadura	7	6	14	9
Derrapamiento	3	2	8	4
Total	1986	2381	2104	

**Fuente:** elaboración propia, con datos de la Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del Municipio de Toluca.

de carretera. Según la tabla 4, el mayor tipo de accidente es la colisión y el atropellamiento, con un promedio al año de 2 052 y 75, respectivamente.

El análisis geográfico está determinado por el visualizador del gvSIG Online, el cual permite relacionar las capas geográficas que se detallan en el apartado 2.2 de este documento, en el que se observan las zonas con mayor densidad de siniestros de tránsito, las vialidades donde se concentran, la población vulnerable a ser perjudicada por un accidente vial e identificar los usos del suelo donde ocurren estos sucesos. En principio, se reconoce que gran parte de los accidentes de tránsito se encuentra en la zona centro de la ciudad (colonia Centro, 5 de mayo y Francisco Murguía). Al relacionar estas zonas con el uso del suelo, se detectó que se trata de un área comercial y de servicios, donde hay mayor flujo económico de la ciudad y, por consiguiente, una considerable afluencia vehicular y peatonal, es decir, es más probable que aquí se produzca un siniestro vial. Por lo tanto, la actividad comercial y de servicios está asociada con una mayor incidencia de accidentes (más de 4 000 siniestros registrados durante el periodo de estudio en esta zona) (Figura 13).

Respecto a las vialidades, es lógico que en las principales se encuentre el mayor número de siniestros de tránsito, debido al alto flujo vehicular y al exceso de velocidad (paseos Adolfo López Mateos, Tollocan y Colón, avenidas Isidro Fabela, Alfredo del Mazo y José López Portillo). Se suman las vías de segundo orden, ya que al ser una conexión con las vialidades primarias presentan los mayores índices de accidentalidad.



**Figura 13.** Relación de los accidentes viales y su respectivo uso del suelo.

Fuente: elaboración propia

## 4.2 SIGESEV-TC: geográfico y estadístico

Los datos suministrados por la Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del municipio de Toluca no son suficientes para realizar análisis exhaustivos discriminados respecto a los factores que influyen en un accidente de tránsito, como vehículos, personas, víctimas y características particulares del accidente.

La sección 3.1.5 de este documento presenta una nueva propuesta para la captura de datos referentes a un accidente de tránsito, con ello se amplía la información para analizar a detalle el fenómeno de siniestralidad vial. Se espera que con el nuevo formulario sea posible estudiar con más precisión y detalle: la localización, las personas involucradas en el siniestro vial, el número de sujetos implicados con su función respectiva (acompañante, motociclista, ciclista, conductor o peatón), el tipo de lesión que sufrió la persona, su edad, género, así como la tipología del accidente.

## 5. Conclusiones

Los sistemas de información geográfica son una herramienta indispensable para la solución de problemáticas a nivel de seguridad vial. El SIGESEV-TC es la prueba de tal afirmación, pues al relacionar aspectos espaciales y estadísticos

en la solución de la problemática que sufre la ciudad de Toluca es posible tener un panorama amplio de este fenómeno, que no sólo sufre la capital del Estado de México, sino múltiples ciudades del país y alrededor del mundo.

La seguridad vial es un tema que se debe tratar con la suficiente seriedad, debido a que uno de los grandes índices de mortalidad en una ciudad se debe a los siniestros de tránsito. De ahí que cada gobierno municipal y estatal debería destinar parte de sus recursos a tratar de solucionar esta problemática, para que la ciudad desarrolle un ambiente seguro y, de manera adecuada y organizada, consiga ser una ciudad inteligente, capaz de administrar sus recursos económicos, sociales y tecnológicos para el avance de la metrópolis en la que viven millones de personas.

Igualmente, este sistema hace posible que la ciudad de Toluca administre y gestione la información de accidentes viales, con el fin de prevenirlos, a través del análisis de los datos y la propuesta de metodologías para solucionar los elementos urbanos e infraestructurales que los causan. Una de las ventajas de esta herramienta es que no sólo se utilice en la zona de estudio elegida, sino que se potencie en otras ciudades y municipios de nuestro país y alrededor del mundo, pues la información concentrada en un sistema apoya en la realización de estudios focalizados a la seguridad vial y toma de decisiones.

El uso de software libre en la construcción de este tipo de sistemas hace que la administración del SIGESEV-TC sea fácil de poner en práctica en los gobiernos y no genera gastos excesivos para su funcionamiento. Por lo tanto, el SIGESEV-TC no sólo es una herramienta íntegra por los datos que utiliza, sino por su relevancia a nivel informático y administración.

## Bibliografía

- Alcaldía de Medellín (2021). GeoMedellín – Portal Geográfico del Municipio de Medellín. <https://www.medellin.gov.co/geomedellin/index.hyg>
- Alcaldía Mayor de Bogotá D. C. (2021). Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbana y Regional. <https://www.simur.gov.co/>
- Alonso Sarría, F. (2014). Sistemas de Información Geográfica. <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- Backhoff Pohls, M. Á., & Vázquez Paulino, J. C. (2002). Sistema de Información Geoestadística para el Transporte. Métodos, organización y descripción operativa. <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt207.pdf>
- Bosque Sendra, J., & Zamora Ludovic, H. E. (2002). Visualización geográfica y nuevas cartografías. *Geofocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 2, 61-77. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3288729>
- Briz-Ponce, L., Juanes-Méndez, J. A., & García-Peñalvo, F. J. (2015). Dispositivos móviles y apps: características y uso actual en educación médica. *Novatica*, 231, 86-91. [https://repositorio.grial.eu/bitstream/grial/424/1/Art%C3%ADculo%20Novatica\\_esp%C3%B1ol.pdf](https://repositorio.grial.eu/bitstream/grial/424/1/Art%C3%ADculo%20Novatica_esp%C3%B1ol.pdf)

- Calle Paz, I. I., & Valles Coral, M. A. (2021). Dashboard digital para el monitoreo de indicadores y metas de los proyectos de consultores San Martín E.I.R.L. *Revista Científica de Sistemas e Informática*, 1(1), 24-36.  
<https://doi.org/10.51252/rcsi.v1i1.94>
- Chagas, D. M. (2014). Herramientas para el reconocimiento de los factores que causan los accidentes de tráfico: estudio de caso en Brasil. Fortaleciendo al sector académico para reducir los siniestros de tránsito en América Latina: investigaciones y casos de estudio en seguridad vial. Banco Interamericano de Desarrollo, Washington D. C., 24-39.  
<https://publications.iadb.org/es/publicacion/17522/fortaleciendo-el-sector-academico-para-reducir-los-siniestros-de-transito-en>
- Falgueras, E. A. (2014). Elementos para la evaluación de interfaces de consulta de bases de datos web. *El Profesional de la Información*, 11(5), 349-360.  
<https://doi.org/10.1076/epri.11.5.349.20225>
- Galicia, E. (2021). Prototipo de sistema de consulta de accidentes viales para los tomadores de decisiones orientados a la seguridad vial en el ayuntamiento del municipio de Toluca, Estado de México.
- Galileo Ingeniería y Servicios (2011). Sistema de Visualización y Explotación de Datos Geográficos. *Ingeniería y Servicios*, 1-6.  
[https://obj.construmatica.com/construmatica/business/files/27723/visualizacion\\_y\\_explotacion\\_de\\_datos\\_geograficos.pdf](https://obj.construmatica.com/construmatica/business/files/27723/visualizacion_y_explotacion_de_datos_geograficos.pdf)
- GITS (2020). Geotecnología en Infraestructura Transporte y Sustentabilidad. *Geografía de la Seguridad Vial*. <https://www.gits.igg.unam.mx/portal/lineas-investigacion/geografia-de-la-seguridad-vial/inicio.html>
- Hinojosa Reyes, R. (2017). Infraestructura urbana, factor influyente de la movilidad urbana y por consecuencia impacta en la seguridad vial, y en la salud pública de la ciudad: caso de estudio, zona metropolitana de la ciudad de Toluca. *Proyección*, 21, 124-144. <https://bdigital.uncu.edu.ar/10300>
- INSP (2020). México, séptimo lugar mundial en siniestros viales. *Gobierno de México*. <https://www.insp.mx/avisos/4761-seguridad-vial-accidentes-transito.html>
- ISO (2012). ISO 39001:2012. *Sistemas de gestión de la seguridad vial. Requisitos y recomendaciones de buenas prácticas*.  
<https://cmdcertification.com/wp-content/uploads/2020/03/ISO-39001-2012.pdf>
- ISO (2013). ISO 19157:2013. Geographic Information-Data Quality.  
<https://www.iso.org/standard/32575.html>
- López, D., & Torres, A. (2015). ¿Cuáles son los componentes del dato espacial? Centro de Investigación en Geografía y Geomática, 1-15. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/181/1/08%C2%BF%20Cu%C3%A1les%20son%20los%20Componentes%20del%20Dato%20Espacial%20-%20Diplomado%20en%20An%C3%A1lisis%20de%20Información%20Geoespacial.pdf>
- Morales, V. P. (2021). *Diseño, creación e implementación de un Dashboard para el seguimiento de peticiones de servicios en el área de mantenimiento, planeación y control de FORD España*. Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/174864>
- Nieto Masot, A., Navazo Arenas, G., & Moreno Marcos, G. (2016). Aplicación de las tecnologías SIG en el análisis de la seguridad vial de las carreteras extremeñas. A. Nieto Masot (ed.), *Tecnologías de la información geográfica en el análisis*

*espacial. Aplicaciones en los sectores público, empresarial y universitario.* Grupo de Investigación en Desarrollo Sostenible y Planificación Territorial y Grupo de Investigación Geo-Ambiental de la Universidad de Extremadura, España, 247-268. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5776243>

- Postigo, R., Escolano, C., Arranz-López, A., Solé, C., Campos, Á., Zúñiga Antón, M., & Hernández-Navarro, M. L., (2013). *Herramientas cartográficas y de visualización para los observatorios territoriales: la valoración de la proximidad de la población a las zonas verdes, equipamientos y servicios en la ciudad de Zaragoza (España)*. 269278885\_Herramientas\_cartograficas\_y\_de\_visualizacion\_para\_los\_observatorios\_territoriales\_la\_valoracion\_de\_la\_proximidad\_de\_la\_poblacion\_a\_las\_zonas\_verdes\_equipamientos\_y\_servicios\_en\_la\_ciudad\_de\_Zaragoza
- Ripoll, L. Q. (2008). *Sistemas de gestión de bases de datos*. Módulo VII: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. EOI. <https://static.eoi.es/savia/documents/componente45499.pdf>
- Robalino, A. D. (2017). *Metodología para el diseño de Dashboards orientado hacia el registro de evidencias en el proceso de evaluaciones institucionales*. Máster thesis, Universidad Internacional de La Rioja. <https://reunir.unir.net/handle/123456789/6171>
- Rodríguez-Dueñas, W. R. (2014). Software libre para educación e investigación en ingeniería. *Revista Educación en Ingeniería*, 9(18), 12-22. <http://www.educacioneningenieria.org/index.php/edi/article/view/383>
- Sánchez Fernández, D., Erena, M., Gambín, M., Hernández, Z., Juárez, J. F., López, J., Pina, D., García, P. & Clemente, A. (2013). *Una herramienta de código abierto para la estrategia territorial en el espacio MED: Geo portal SDIMED*. [https://www.researchgate.net/publication/259501990\\_Una\\_herramienta\\_de\\_codigo\\_abierto\\_para\\_la\\_estrategia\\_territorial\\_en\\_el\\_espacio\\_MED\\_Geoportal\\_SDIMED](https://www.researchgate.net/publication/259501990_Una_herramienta_de_codigo_abierto_para_la_estrategia_territorial_en_el_espacio_MED_Geoportal_SDIMED)
- SE y Datawheel (2020). *Municipio del Estado de México-Toluca. DataMéxico*. <https://datamexico.org/es/profile/geo/toluca?indicatorCensus=Total+Income&totalGenderSelector1=gender0#industrial-parks>
- Stallman, R. (2015). Software libre para una sociedad libre. *Traficante de Sueños*. Madrid, <https://es.scribd.com/doc/66456068/Software-Libre-para-una-sociedad-libre-Richard-Stallman>
- Thompson, F. (2016). *Cómo armar una verdadera arquitectura tecnológica*. CIO México, 4 de enero. <https://cio.com.mx/armar-una-verdadera-arquitectura-tecnologica/>
- UM (2011). *Manual básico de creación de páginas web. Universidad de Murcia y Área de la Tecnología de la Información y las Comunicaciones Aplicadas*. <https://www.aragonemprendedor.com/archivos/descargas/html.pdf>
- Wong Durand, S. (2017). *Análisis y requerimientos de software: manual autoformativo interactivo*. Universidad Continental, 1-128. [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/4281/1/DO\\_FIN\\_103\\_MAI\\_UC0939\\_2018.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/4281/1/DO_FIN_103_MAI_UC0939_2018.pdf)
- Zaragoza, M., & Islas, V. (2017). *Análisis de los sistemas de transporte. Vol. I: conceptos básicos*. 307, Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, 75. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt307.pdf>

# Dendrogeomorphology as a tool to depict hydrogeomorphic processes in the tropics

La dendrogeomorfología como una herramienta para representar procesos hidrogeomorfológicos en los trópicos

Adolfo Quesada-Roman<sup>1</sup>

*Recibido 8 de agosto de 2022; aceptado 24 de septiembre de 2022*

## ABSTRACT

Climatic and anthropogenic changes cause the deprivation of distinct ecosystems in Costa Rica, transforming climatic, ecological, and geomorphic conditions. The high tropical biodiversity of Costa Rica and the tropics is suitable to improve the understanding of hydrogeomorphic process dynamics and to produce baseline data on past disasters in scarce-data regions. The principal motivation to connect natural hazards and dendrochronology on tropics is the desire to create methods that can reduce its exposure and vulnerability. The principal research aim of this study is to give reference data that can improve the understanding of hydrogeomorphic processes and to explore the potential of tropical trees in dendrochronological applications. This paper combines remote sensing, meteorological assessments, and dendrochronology analyses, hydraulic modelling, and risk assessments. This innovative research describes the reduced understanding in tree-ring analysis in Costa Rica related with past disasters and their linkage to climate. This study will likely contribute to the implementation of new methodologies in disaster risk research, and it will promote future adaptation strategies in the most biodiverse region of the world.

*Key words: dendrochronology, natural hazards, disaster risk reduction, tropics, developing countries.*

## RESUMEN

Los cambios climáticos y antropogénicos están contribuyendo a la degradación de diferentes ecosistemas en Costa Rica, alterando así las condiciones climáticas,

<sup>1</sup> Universidad de Costa Rica, e-mail: [adolfo.quesada@gmail.com](mailto:adolfo.quesada@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6601-5254>.

ecológicas y geomórficas. La hipótesis de este trabajo es que la alta biodiversidad tropical de Costa Rica y los trópicos es adecuada para mejorar la comprensión de la dinámica de los procesos hidrogeomórficos y generar datos de referencia sobre desastres pasados en una región con datos limitados. La principal motivación para vincular las amenazas naturales y la dendrocronología en esta región de baja latitud es la persistente escasez de datos sobre procesos hidrogeomórficos pasados y el deseo de definir métodos que puedan reducir su exposición y vulnerabilidad. Por lo tanto, el principal objetivo de investigación de este estudio fue proporcionar datos de referencia que puedan mejorar la comprensión de los procesos hidrogeomórficos, así como explorar el potencial de las especies de árboles tropicales en aplicaciones dendrocronológicas. Por lo tanto, este estudio combina sensores remotos, evaluaciones meteorológicas y técnicas de anillos de árboles con análisis estadísticos, modelos hidráulicos y evaluaciones de riesgos. La naturaleza innovadora de esta investigación describió la muy limitada experiencia disponible en términos de análisis de anillos de árboles en Costa Rica y la clara falta de comprensión sobre desastres pasados y su vínculo con el clima. Es probable que este estudio contribuya a la implementación de nuevas metodologías en la investigación del riesgo de desastres y, con suerte, contribuirá a futuras estrategias de adaptación en los trópicos, la región con mayor biodiversidad del mundo.

Palabras clave: *dendrocronología, amenazas naturales, reducción del riesgo de desastres, trópicos, países en desarrollo.*

## 1. Introduction

Weather-related disasters tend to sum most casualties and economic losses every year at a worldwide level. Forecasting hydrometeorological hazards remains challenging despite improved knowledge of potential triggers and sophisticated climato-logical models. Furthermore, climate change will affect the occurrence and the nature of processes, rendering accurate predictions even more challenging in data-scarce regions. Global warming is expected to lead to an increase in flooding over the decades to come, with delicate consequences on livelihoods (UNDRR, 2019; Pinos & Quesada-Román, 2022). Therefore, more research is therefore critically needed to reduce uncertainties of climate change scenarios related to climate and hydrological models (Kundzewicz *et al.*, 2018).

The tropics count for approximately 20% of the world land surface (Peel *et al.*, 2007), but they accommodate the 50% of the global population (Tatem, 2017), and are affected by substantial land-use changes (Hettig *et al.*, 2016). Moreover, developing countries have fast urbanization and increasing population density processes resulting in greater exposure and vulnerability (Mitchell *et al.*, 2015). Consistently, low-latitude regions usually present high values for expected socio-economic losses due to earthquakes, volcanic risks, landslides, floods, storm surges, and tropical cyclones (Figure 3). Developing countries in the low latitudes are largely more affected by disasters worldwide (Noy, 2009).

Most common hydrometeorological hazards on tropics are landslides, floods, tropical storms, and droughts (UNISDR, 2009). On one hand, tropical regions are

hotspots for landslides (Lin *et al.*, 2017). Landslides are linked to rainfall intensity and duration (Segoni *et al.*, 2018; Carrión *et al.*, 2021). The past and projected global mortality risk of landslide around the world shows a close link with tropical mountain regions (Kirschbaum *et al.*, 2015; Shi & Karspersen, 2015). On the other hand, tropical floods are controlled by land-use changes, floodplain occupation, intense yearly or extraordinary rainfall processes (Syvitski *et al.*, 2014). Different climatic modes (e.g., AMO and ENSO) control the occurrence of extraordinary rainfall events in low latitudes such as tropical cyclones (Goldenberg *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2017; NOAA, 2022). Thus, bigger inlets and faster change rates have recently caused more extreme tropical floods (Wohl, 2006).

Hydrogeomorphology is an interdisciplinary discipline focusing on interactions of hydrologic with geomorphic processes in their temporal and spatial dimensions (Sidle & Onda, 2004). Depending on the scale, climate, topography, soils, vegetation, and land use affect differentially hydrogeomorphic processes. Most catchment studies still lack the information to measure runoff, erosion processes, and sediment transport processes. There is a necessity to perform these studies at different scales, combined with long-term catchment monitoring to generate field data to parameterize, test, and accurately calibrate numerical models (Sidle *et al.*, 2017). Nonetheless, such information normally lacks in low latitudes (Wohl *et al.*, 2012).

Dendrogeomorphic applications provide results that can reduce the information gaps of regions with data scarcity. Botanical evidence is a critical proxy to determine the magnitude and frequency of hydrogeomorphic processes, e.g., floods, landslides, and debris flows (Stoffel & Bollschweiler, 2008; Stoffel *et al.*, 2013; Stoffel & Corona, 2014). A key implication of the vegetation-hydrogeomorphology linkage is that woody plants can allow reconstruction of ecological and hydrogeomorphic processes over several decades to centuries (Stoffel & Wilford, 2012). The hydrogeomorphic process information gathered by means of dendrogeomorphic techniques can certainly improve model uncertainties, event reconstruction and hazard zonation (Allen *et al.*, 2018).

Since data on past events is critically lacking in tropical regions, this research aims to investigate the potential of tropical dendrochronology to assess hydrogeomorphic processes and to reduce uncertainties for risk assessments. Tropical mountains are dynamic regions with energetic torrents that commonly comprise dense vegetation, making possible the dendrogeomorphology implementation as a reliable method to assess hydrogeomorphic processes. Therefore, this research will present geomorphic, hydrological, dendrochronological, and risk assessment applications made in Costa Rica as a tropical/development study example for limited data regions/countries.

## **2. Materials and methods**

### **2.1. Costa Rica: an Earth sciences' small lab**

Tectonic activity of Costa Rica is composed by the interaction subduction margin of the Cocos and Caribbean plates, the microplate of Panama, and the

subduction of the Cocos volcanic ridge (Alvarado *et al.*, 2017). The country is divided in three morphotectonic units: a forearc, a volcanic front, and a backarc that comprise the country's lithology (Marshall, 2007). The forearc widens along the Pacific seaside with intricate morphologies since Cretaceous age (Denyer & Alvarado, 2007). The volcanic front comprises the main cordilleras made mostly of volcanic and sedimentary rocks since Paleogene age (Alvarado, 2021). The backarc spreads since the Caribbean plains of Tortuguero's flatlands to the hilly relief of the south Caribbean (Quesada-Román & Pérez-Briceño, 2019). The principal geomorphic dynamics in the country are fluvial, volcanic, and coastal, but some karstic and glacial areas also pop up (Quesada-Román & Pérez-Umaña, 2020).

The continuous sequence of cordilleras that cross over Costa Rica with an NW-SE alignment characterizes the Pacific and Caribbean basins. This topographic barrier also controls the amount of rainfall in each basin: Pacific and Caribbean (Amador *et al.*, 2010; Quesada-Román *et al.*, 2020b). The Pacific climate shows a bimodal precipitation regime, but it is hard to identify a dry period in the Caribbean climate (Castillo & Amador, 2020). The Caribbean side's annual rainfall totals are up to 3000 mm; they are generally below 3 m in the Pacific. These climatological characteristics justify that over a ninety percent of disasters in the country are hydrometeorological. Moreover, sixty percent are floods and thirty percent are mass movements (Campos-Durán & Quesada-Román, 2017; LA RED, 2022).

The country's population reached 5 million people in 2018, and, over the last decades, its dynamics changed from a significant rurality to a strong urban trend achieving three quarters of the inhabitants in 2011. Mass movement and flooding research have been vast in different regions of the country but mostly in Spanish (Quesada-Román, 2021; 2022). Nevertheless, the production of detailed-scale hazard maps and its combination with vulnerability and risk calculation is scarce (Quesada-Román *et al.*, 2021c).

## 2.2. Fieldwork

Fieldwork for this study summed the experience working in this territory since 2010, but specifically for this research between 2016 and 2019. This study analyzed the hillslopes of the Miravalles volcano, low and flatlands of Upala at northern Costa Rica, and Térraba catchment at southern Costa Rica. Geomorphological mapping fieldwork procedures were made characterizing gravitational and fluvial landforms and checking the pre-mapping subproducts in all the sites. During the field surveys dendrogeomorphic techniques were used taking samples from impacted trees to reconstruct the water heights using their scars in Térraba catchment. These heights were after used to model hydraulic models and calculate peak flows. During field-works drone flights were made to survey river reaches that eventually were used in hydraulic models.

### 2.3. Statistical analysis

This study applied Pearson correlation equations and performed generalized linear models (GLM) to describe statistically significant linkages between obtained variables with other environmental parameters. Based on the Akaike Information Criterion (AIC), we used a backward selection to contrast the full models against the alternative models. Using z-score co-variables were standardized (regression coefficient divided by standard error). Model variables were used to evaluate the weight of each interaction explaining the studied parameters. Examples of these applications were: a) variables controlling landslides occurrence after an earthquake and hurricane in 2016 at northern Costa Rica (Quesada-Román *et al.*, 2019), and b) geomorphic and hydrological parameters influencing peak discharges at local and regional scale at southern Costa Rica (Quesada-Román *et al.*, 2020a, 2022).

Two-dimensional (2D) hydrodynamic models using IBER were used to model water depth of flood event related to Tropical Storm Nate in 2017 in seven stream reaches (Quesada-Román *et al.*, 2020a). Bed friction was estimated in the reaches with Manning's n roughness coefficient as homogenous roughness units. The following Manning values were used: n= 0.075 (main channel), 0.16 (forest), and 0.08 (sparse vegetation). Modeled successive inlet discharges based on historical extremes were computed. Available data from hydrological data of yearly maximum flows from eight stations from 1962-2019 was employed to apply a regional flood-frequency method employing the Bayesian MCMC (Markov Monte Carlo Chain) algorithm (Quesada-Román *et al.*, 2022).

### 2.4. Risk mapping

First, several morphometric and morphogenetic maps were made in the different stages and places of this work (Quesada-Román & Villalobos-Chacón, 2020). The study follows a threefold stepwise geomorphological mapping which is integrated by a pre-mapping, fieldwork, and post-mapping phase. Those maps are the baseline for other flood and landslides maps. A flood risk assessment merged the regional flood-frequency study coupled with dendrochronology (hazard), a detailed cartography of population/infrastructure density (exposure), and a social development index (vulnerability) in one of the study applications in Térraba catchment (Quesada-Román *et al.*, 2022).

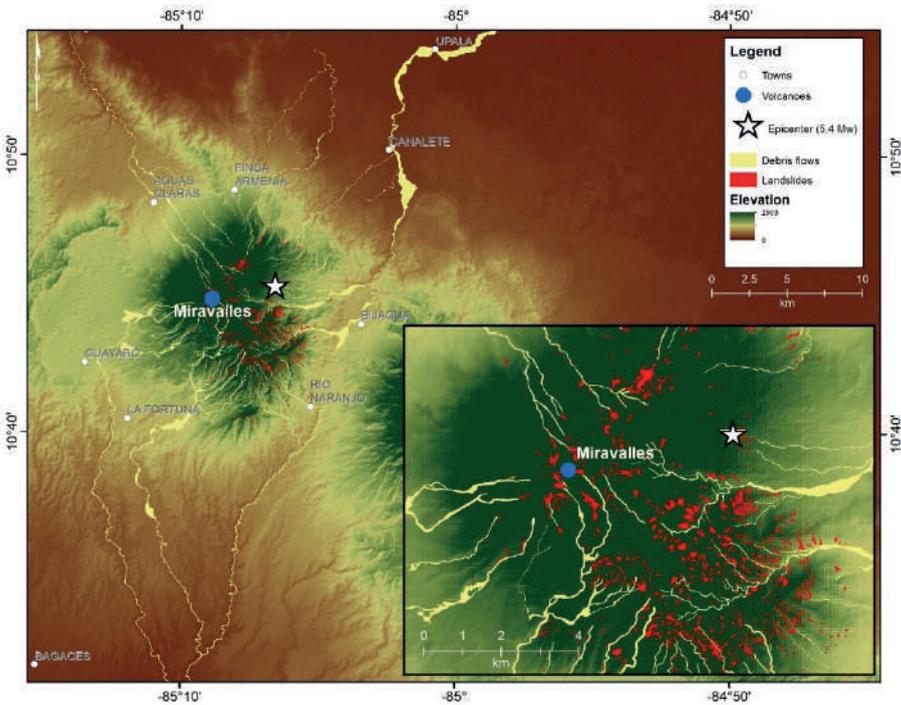
## 3. Results

### 3.2. Can earthquakes, hurricanes, and landslides interact?

The Miravalles volcano, in northern Costa Rica, was impacted by an earthquake of 5.4 Mw (July, 2016) and followed by extraordinary precipitations associated to the Hurricane Otto (category 3) just a few weeks after (November, 2016).

Hurricane Otto passing left roughly 300 mm of rain over the volcano. Using a general linear regression model (GLM), it was possible to characterize the interactions among the parameters influencing landslides (epicenter distance, precipitation, altimetry, and slope).

The cascading 2016 disaster caused 942 mass movements (Figure 1). 62% of them occurred between 3 to 6 km from the prior epicenter and in the E, SE, and S slopes of Miravalles volcano where local faults density concentrate, and precipitation summed maximum values throughout the cyclone. The GLM validates a combined earthquake-hurricane coupling with greater massmovements densities near the epicenter, at zones with greater rainfall totals, steep and higher regions.



**Figure 1.** Debris flows and landslides generated by Hurricane Otto over Miravalles volcano.

The application of Sentinel-1 synthetic aperture radar and WorldView-3 and -4 images helped to map the flooded areas derived by Hurricane Otto in Upala municipality (Figure 3). Debris flows impacted roughly 27 km<sup>2</sup> (Figure 2) and moved down the slopes as flash floods in approximately 74 km<sup>2</sup> (Figure 4), with eight casualties in the vicinity of the Miravalles volcano and roughly 10 million US\$ of economic impacts in Bagaces and Upala municipalities.

### 3.3. Botanical evidence, hydrological, and disaster risk assessments

The Térraba catchment in central-south has the bigger area and peak discharge records in Costa Rica with 4765 km<sup>2</sup>. Seven random sample places along the catchment were used to reconstruct the peak discharge of a recent tropical cyclone (Tropical Storm Nate, 2017) employing botanical evidence, especially scars on the trees (Figure 5). Interestingly, trees on cut banks or terraces have minimal uncertainties among observed and modeled heights of flows, not in straight channel reaches (Figure 6).



**Figure 2.** a) Flights over Miravalles volcano following the cyclone. b) Mass movements on Miravalles volcano NE slope. c) Large blocks and wood moved along the NE volcano slope. d) The debris flows produced four casualties and immense economic losses.

In the second phase, the regional flood-frequency analyses were performed. The study combined a dendrochronology assessment and peak discharge calculation to obtain flood return periods. These return periods were merged with the Topographic Wetness Index (TWI) to ascertain regional flood hazards throughout riverbeds and surrounding areas. Flood exposure was determined using the population and infrastructure density. Flood

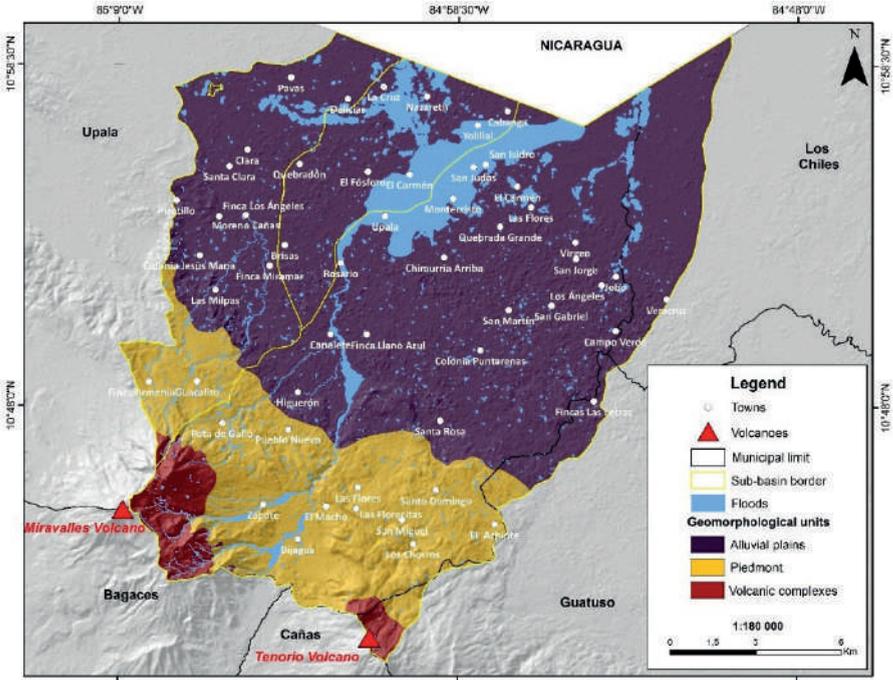


Figure 3. Geomorphological units and Hurricane Otto flash floods in Upala municipality.

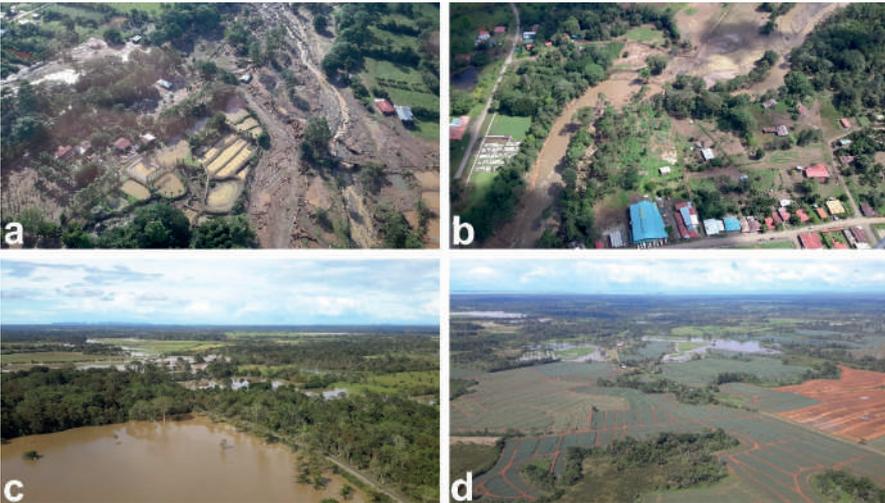


Figure 4. Flights over Upala after the passing Hurricane Otto. Debris flows and flash floods carried large wood (a). Downstream the floodplains spread out (b). Rice and pineapple croplands, and forest/wetlands fragmented areas were the most flooded areas (c, d).



**Figure 5.** Successive inlet modeled discharges using historical extremes, dendrogeomorphology, and a two-dimensional hydrodynamic model to calculate peak discharges.

vulnerability was based on the social development index (IDS, 2017) which merges fourteen socioeconomic parameters nationally (MIDE-PLAN, 2017).

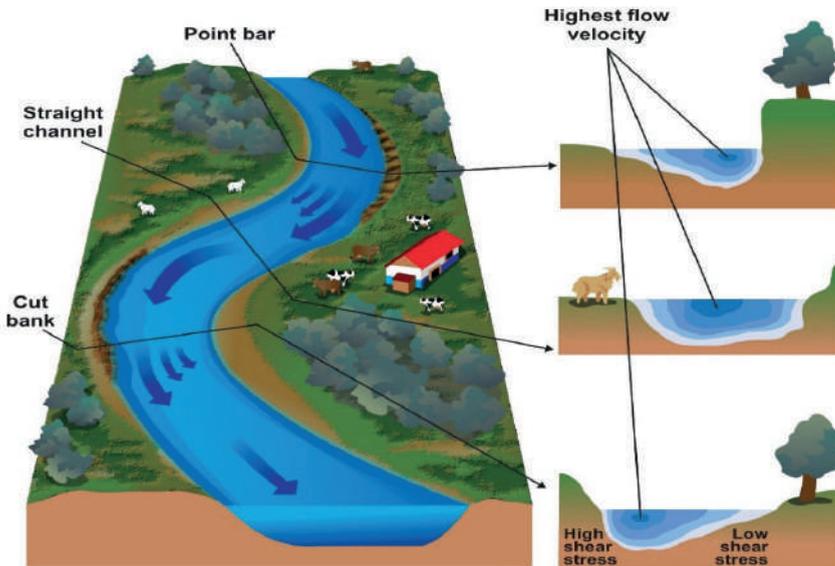
The highest risk values are distributed throughout the catchment in confined sites but mainly located in General, Unión, Pejibaye, Ceibo, and Limón catchments, which are very populated, less favored, or indigenous regions. Medium and low risk results responded to less populated catchments, mainly agricultural areas such as Pacuar, some parts of Volcán, General, and Coto Brus. The transdisciplinary approaches combination proved useful in the scarce-information Térraba catchment and about 6000 people live in loading risky areas (Figure 7).

## 4. Discussion

### 4.1. Monitoring earthquake-cyclones interaction regions

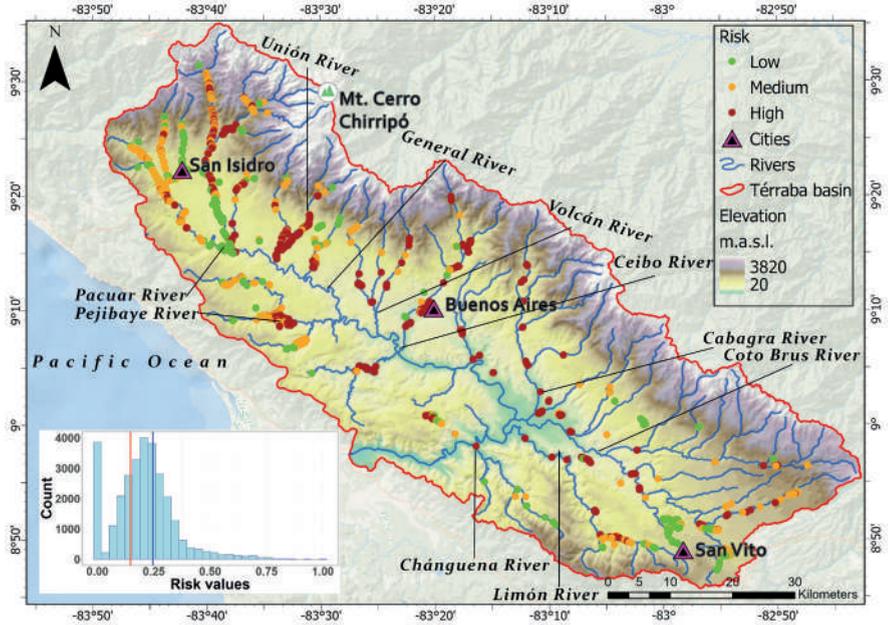
The consequent occurrence of earthquakes and extraordinary hydrometeorological events trigger compound and amplified disasters

(Wallemacq & House, 2018). Central American tectonic dynamics make this region remarkably vulnerable to mass movements (Alvarado *et al.*, 2017). Moreover, high weathering and wet soils conditions are ideal for earthquake-induced landslides (Bommer & Rodríguez, 2002). In addition, high precipitation in Central America triggers several landslides every year. Consequently, the isthmus has a very high link among mean daily rainfall totals and mean daily landslides worldwide (Froude & Petley, 2018). Therefore, a good recommendation is to monitor earthquake previously affected regions during subsequent extraordinary rainfall events (Piciullo *et al.*, 2018).



**Figure 6.** Tree's geomorphic location controls the uncertainties among observed (scars) and calculated peak discharge. Uncertainties are lower on stable fluvial landforms such as point bars, terraces, and cut banks.

Large wood on debris-flows generated critical impacts on infrastructure during the Hurricane Otto. Tropical conditions promote great wood decay and therefore catchments can transport high capacity of trunks linked with large peak discharge (Cadol *et al.*, 2009; Wohl *et al.*, 2017). Hence, large wood is a risk enhancer of infrastructure damage, block river channels, and intensify floods (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2016). An extraordinary number of large wood pieces were withdrawn from the channel network around Miravalles volcano days after the event.



**Figure 7.** Flood risk determination for the Térraba catchment at central-south Costa Rica.

**4.2. Tropical dendrogeomorphic peak discharge calculation reliability**

The use of UAV photogrammetry can generate high-resolution orthoimages which can reduce topography uncertainties. This information is key to produce good digital surface models and precise hydraulic models. The study results are even similar or lower than temperate regions such as Poland (Ballesteros-Cánovas *et al.*, 2016), United States (Yanosky & Jarrett, 2002), Canada (Gottesfeld, 1996), Spain (Ballesteros-Cánovas *et al.*, 2011a, b; Victoriano *et al.*, 2018), Canary Islands (Garrote *et al.*, 2018), or Bhutan (Speer *et al.*, 2019).

The trees located on point bars and straight channels are impacted by higher flow velocities and Froude numbers in the hydraulic model. For future assessments, to significantly reduce the time in dendrogeomorphic sampling and to enhance results is compulsory to use more stable landforms such as cut banks and alluvial terraces. These results were consistent with previous studies (Ballesteros-Cánovas, 2011a; Gottesfeld, 1996; Yanosky & Jarret, 2002; Victoriano *et al.*, 2018).

**4.3. Are disaster risk assessments possible in scarce-data countries?**

Regional flood risk assessments in large scale geomorphic units are achievable using a group of general (systematic hydrological data, socioeconomic indexes) and high-resolution inputs (UAV images, hydraulic models, detailed population density data). Térraba catchment most inhabitants are considered to live in

rural settings and associated with agriculture (INEC, 2020). Community capital and spatial variability define rural areas disaster resilience (Cutter *et al.*, 2016). Communities closer to urban centers have an improved capacity dealing with flooding (Jamshed *et al.*, 2020). Moreover, developing countries' rural areas are extremely vulnerable to disasters. Furthermore, its vulnerability responds with high migration levels, dispersed benefit from social protection programs, and scarcer or no savings to soft the impacts (Deria *et al.*, 2020). Additionally, Térraba catchment comprise numerous indigenous territories that should be evaluated by their knowledge and cultural characteristics (Kelman *et al.*, 2012). Therefore, rural, and indigenous revenues rely on livelihood assets surrounded by vulnerable or protected ecosystems (UNDRR, 2019). Therefore, developing countries' lower income households in rural are greatly affected by the impact of disasters (Jakobsen, 2012; Arouri *et al.*, 2015). For instance, public policies such as poverty reduction, territorial planning, and environmental management should be primary instruments governing disaster risks (Lavell & Maskrey, 2014).

## 5. Conclusions

This research found a set of future research lines for natural hazards and dendrochronology in Costa Rica and the tropics. The study of hydrogeomorphic processes can be improved through the creation of higher-resolution baseline data, especially also in terms of better imagery (e.g., satellite, airborne, drones, LiDAR) and more intensive fieldwork to generate better geomorphic maps and statistical modelling to develop suitable natural hazard assessments and zonation. Previously affected mountain regions by earthquakes must be monitored in extraordinary precipitation events to anticipate further disasters. Areas where mass movements generated by earthquakes and subsequent strong rainfall events can be triggered are necessary to be studied to minimize casualties and losses in developing countries. Flood-frequency analyses with dendrogeomorphic estimations and hydrological measurements can be precisely used to calculate cyclone-induced peak discharges and floods. Coarse and detailed data can be useful implementing regional flood risk evaluations in large-scale catchments. A regional flood-frequency approach in parallel with dendrogeomorphology and risk assessment is a practical contribution for territorial planning strengthening the resilience of tropical catchments populations. This multidisciplinary procedure can be employed in countries where hydrological reference information is limited.

## References

- Allen, S. K., Ballesteros-Canovas, J., Randhawa, S. S., Singha, A. K., Huggel, C., & Stoffel, M. (2018). Translating the concept of climate risk into an assessment framework to inform adaptation planning: Insights from a pilot study of flood risk in Himachal Pradesh, Northern India. *Environmental science & policy*, 87, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.013>

- Alvarado, G. E., Benito, B., Staller, A., Climent, A., Camacho, E., Rojas, W., Marroquín, G., Molina, E., Talavera, J. E., Martínez-Cuevas, S., & Lindholm, C. (2017). The new Central American seismic hazard zonation: mutual consensus based on up to day seismotectonic framework. *Tectonophysics*, 721, 462-476.  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>
- Alvarado, G. E. (2021). *Costa Rica y sus volcanes*. San José, Costa Rica: EUCR, EUNA, ETCR.
- Amador, J. A., Alfaro, E. J., Rivera, E. R., & Calderón, B. (2010). Climatic features and their relationship with tropical cyclones over the Intra-Americas seas. In *Hurricanes and climate change*, 149-173. Springer, Dordrecht.  
[https://doi.org/10.1007/978-90-481-9510-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9510-7_9)
- Arouri, M., Nguyen, C., & Youssef, A. B. (2015). Natural disasters, household welfare, and resilience: evidence from rural Vietnam. *World development*, 70, 59-77.  
<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.12.017>
- Ballesteros, J. A., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Sanchez-Silva, M., & Stoffel, M. (2011). Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *Journal of Hydrology*, 403(1-2), 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.045>
- Ballesteros Canovas, J. A., Eguibar, M., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., & Gutiérrez-Pérez, I. (2011). Estimating flash flood discharge in an ungauged mountain catchment with 2D hydraulic models and dendrogeomorphic palaeostage indicators. *Hydrological Processes*, 25(6), 970-979.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.7888>
- Ballesteros-Cánovas, J. A., Stoffel, M., Spyt, B., Janecka, K., Kaczka, R. J., & Lempa, M. (2016). Paleoflood discharge reconstruction in Tatra Mountain streams. *Geomorphology*, 272, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.004>
- Bommer, J. J., & Rodríguez, C. E. (2002). Earthquake-induced landslides in Central America. *Engineering Geology*, 63(3-4), 189-220.  
[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00081-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00081-3)
- Cadol, D., Wohl, E., Goode, J. R., & Jaeger, K. L. (2009). Wood distribution in neo-tropical forested headwater streams of La Selva, Costa Rica. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(9), 1198-1215. <https://doi.org/10.1002/esp.1800>
- Campos-Durán, D. F., & Quesada-Román, A. (2017). Impacto de los eventos hidrometeorológicos en Costa Rica, periodo 2000-2015. *Geo Uerj*, (30), 440-465.  
<https://doi.org/10.12957/geouerj.2017.26116>
- Carrión-Mero, P., Montalván-Burbano, N., Morante-Carballo, F., Quesada-Román, A., & Apolo-Masache, B. (2021). Worldwide research trends in landslide science. *International journal of environmental research and public health*, 18(18), 9445.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph18189445>
- Castillo, R., & Amador, J. A. (2020). Precipitation and Temperature in Costa Rica at the End of the Century Based on NEX-GDDP Projected Scenarios. *Atmosphere*, 11(12), 1323. <https://doi.org/10.3390/atmos11121323>
- Cutter, S. L., Ash, K. D., & Emrich, C. T. (2016). Urban-rural differences in disaster resilience. *Annals of the American Association of Geographers*, 106(6), 1236-1252.  
<https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1194740>
- Denyer, P., & Alvarado, G. E. (2007). *Mapa geológico de Costa Rica*. Escala 1:400 000. Librería Francesa. San José, Costa Rica.
- Deria, A., Ghannad, P., & Lee, Y. C. (2020). Evaluating implications of flood vulnerability factors with respect to income levels for building long-term disaster resilience

- of low-income communities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 48, 101608. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101608>
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161-2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- Garrote, J., Díez-Herrero, A., Génova, M., Bodoque, J. M., Perucha, M. A., & May-er, P. L. (2018). Improving flood maps in ungauged fluvial basins with dendrogeomorphological data. An example from the Caldera de Taburiente National Park (Canary Islands, Spain). *Geosciences*, 8(8), 300. <https://doi.org/10.3390/geosciences8080300>
- Goldenberg, S. B., Landsea, C. W., Mestas-Nuñez, A. M., & Gray, W. M. (2001). The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*, 293 (5529), 474-479. <https://doi.org/10.1126/science.1060040>
- Gottesfeld, A. S., & Gottesfeld, L. M. J. (1990). Floodplain dynamics of a wandering river, dendrochronology of the Morice River, British Columbia, Canada. *Geomorphology*, 3(2), 159-179. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(90\)90043-P](https://doi.org/10.1016/0169-555X(90)90043-P)
- Hettig, E., Lay, J., & Sipangule, K. (2016). Drivers of households' landuse decisions: A critical review of micro-level studies in tropical regions. *Land*, 5 (4), 32. <https://doi.org/10.3390/land5040032>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2020). *National Population Projections for 2020 based on 2011 National Census*. San José, Costa Rica. Available on <https://www.inec.cr/poblacion/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion>
- Jakobsen, K. T. (2012). In the eye of the storm—The welfare impacts of a hurricane. *World Development*, 40(12), 2578-2589. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2012.05.013>
- Jamshed, A., Birkmann, J., Rana, I. A., & Feldmeyer, D. (2020). The effect of spatial proximity to cities on rural vulnerability against flooding: An indicator based approach. *Ecological indicators*, 118, 106704. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106704>
- Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou, Y. (2015). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 249, 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Kelman, I., Mercer, J., & Gaillard, J. C. (2012). Indigenous knowledge and disaster risk reduction. *Geography*, 97(1), 12-21. <https://doi.org/10.1080/00167487.2012.12094332>
- Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Benestad, R. E., Hov, Ø., Piniewski, M., & Otto, I. M. (2018). Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environmental Science & Policy*, 79, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.008>
- LA RED (2022). *DesInventar-Inventory system of the effects of disasters*. Corporación OSSA, Cali, Colombia. Available at: <http://desinventar.org>,
- Lavell, A., & Maskrey, A. (2014). The future of disaster risk management. *Environmental Hazards*, 13(4), 267-280. <https://doi.org/10.1080/17477891.2014.935282>
- Lin, L., Lin, Q., & Wang, Y. (2017). Landslide susceptibility mapping on a global scale using the method of logistic regression. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(8), 1411-1424. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1411-2017>
- Marshall, J. (2007). The Geomorphology and Physiographic Provinces of Central America. In: Bundschuh, J., Alvarado, G E. (Eds.). *Central America: Geology, Resources and Hazards*. Taylor & Francis. p. 1436.

- MIDEPLAN - Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (2017). *Índice de Desarrollo Social 2017*. San José, Costa Rica. p. 126.
- Mitchell, D., Enemark, S., & Van Der Molen, P. (2015). Climate resilient urban development: Why responsible land governance is important. *Land Use Policy*, 48, 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.026>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2022). *El Niño and La Niña years and intensities based on Oceanic Niño Index (ONI)*. [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- Noy, I. (2009). The macroeconomic consequences of disasters. *Journal of Development economics*, 88(2), 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2008.02.005>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Piciullo, L., Calvellido, M., & Cepeda, J. M. (2018). Territorial early warning systems for rainfall-induced landslides. *Earth-Science Reviews*, 179, 228-247. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.013>
- Pinos, J., & Quesada-Román, A. (2021). Flood risk-related research trends in Latin America and the Caribbean. *Water*, 14(1), 10. <https://doi.org/10.3390/w14010010>
- Quesada-Román, A., Fallas-López, B., Hernández-Espinoza, K., Stoffel, M., & Ballesteros-Cánovas, J. A. (2019). Relationships between earthquakes, hurricanes, and landslides in Costa Rica. *Landslides*, 16(8), 1539-1550. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01209-4>
- Quesada-Román, A., & Pérez-Briceño, P. M. (2019). Geomorphology of the Caribbean coast of Costa Rica. *Journal of maps*, 15(2), 363-371. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1600592>
- Quesada-Román, A., Pérez-Umaña, D., 2020. State of the Art of Geodiversity, Geoconservation, and Geotourism in Costa Rica. *Geosciences*, 10(6), 211. <https://doi.org/10.3390/geosciences10060211>
- Quesada-Román, A., & Villalobos-Chacón, A. (2020). Flash flood impacts of Hurricane Otto and hydrometeorological risk mapping in Costa Rica. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 120(2), 142-155. <https://doi.org/10.1080/00167223.2020.1822195>
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Granados-Bolaños, S., Birkel, C., & Stoffel, M. (2020a). Dendrogeomorphic reconstruction of floods in a dynamic tropical river. *Geomorphology*, 359, 107133. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107133>
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Guillet, S., Madrigal-González, J., & Stoffel, M. (2020b). Neotropical *Hypericum irazuense* shrubs reveal recent ENSO variability in Costa Rican páramo. *Dendrochronologia*, 61, 125704. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125704>
- Quesada-Román, A., Villalobos-Portilla, E., & Campos-Durán, D. (2021c). Hydrometeorological disasters in urban areas of Costa Rica, Central America. *Environmental Hazards*, 20(3), 264-278. <https://doi.org/10.1080/17477891.2020.1791034>
- Quesada-Román, A. (2021). Landslide risk index map at the municipal scale for Costa Rica. *International journal of disaster risk reduction*, 56, 102-144. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102144>

- Quesada-Román, A. (2022). Flood risk index development at the municipal level in Costa Rica: A methodological framework. *Environmental Science & Policy*, 133, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.012>
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Granados-Bolaños, S., Birkel, C., & Stoffel, M. (2022). Improving regional flood risk assessment using flood frequency and dendrogeomorphic analyses in mountain catchments impacted by tropical cyclones. *Geomorphology*, 396, 108000. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108000>
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A. M., Marston, R. A., & Stoffel, M. (2016). Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Reviews of Geophysics*, 54(3), 611-652. <https://doi.org/10.1002/2015RG000514>
- Segoni, S., Piciullo, L., & Gariano, S. L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15(8), 1483-1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>
- Shi, P. & Karsperson, R. (2015). World atlas of natural disaster risk. Heidelberg: Springer.
- Sidle, R. C., Gomi, T., Usuga, J. C. L., & Jarihani, B. (2017). Hydrogeomorphic processes and scaling issues in the continuum from soil pedons to catchments. *Earth-Science Reviews*, 175, 75-96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.010>
- Sidle, R. C., & Onda, Y. (2004). Hydrogeomorphology: overview of an emerging science. *Hydrological processes*, 18(4), 597-602. <https://doi.org/10.1002/hyp.1360>
- Speer, J. H., Shah, S. K., Truettner, C., Pacheco, A., Bekker, M. F., Dukpa, D., Cook, E. J., Tenzin, K. (2019). Flood History and River Flow Variability Recorded in Tree Rings on the Dhur River, Bhutan. *Dendrochronologia*, 56, 125605. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125605>
- Sun, C., Kucharski, F., Li, J., Jin, F. F., Kang, I. S., & Ding, R. (2017). Western tropical Pacific multidecadal variability forced by the Atlantic multidecadal oscillation. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms15998>
- Stoffel, M., & Bollschweiler, M. (2008). Treering analysis in natural hazards research: an overview. *Natural hazards and earth system sciences*, 8(2), 187-202. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-187-2008>
- Stoffel, M., & Wilford, D. J. (2012). Hydrogeomorphic processes and vegetation: disturbance, process histories, dependencies and interactions. *Earth Surface-Processes and Landforms*, 37(1), 9-22. <https://doi.org/10.1002/esp.2163>
- Stoffel, M., Butler, D. R., & Corona, C. (2013). Mass movements and tree rings: A guide to dendrogeomorphic field sampling and dating. *Geomorphology*, 200, 106-120. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.017>
- Stoffel, M., & Corona, C. (2014). Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Treering research*, 70(1), 3-2. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-70.1.3>
- Syvitski, J. P., Cohen, S., Kettner, A. J., & Brakenridge, G. R. (2014). How important and different are tropical rivers?—An overview. *Geomorphology*, 227, 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.029>
- Tatem, A. J. (2017). WorldPop, open data for spatial demography. *Scientific data*, 4(1), 1-4. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.4>
- UNDRR (United Nations Disaster Risk Reduction) (2019). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Geneva, Switzerland.

- UNISDR (United Nations Disaster Risk Reduction) (2009). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Geneva, Switzerland.
- Victoriano, A., Díez-Herrero, A., Génova, M., Guinau, M., Furdada, G., Khazaradze, G., & Calvet, J. (2018). Fourtopic correlation between flood dendrogeomorphological evidence and hydraulic parameters (the Portainé stream, Iberian Peninsula). *Catena*, 162, 216-229. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.009>
- Wallemacq, P., & House, R. (2018). *Economic losses, poverty & disasters*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters and United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland. pp (1-30).
- Wohl, E. (2006). Human impacts to mountain streams. *Geomorphology*, 79(3-4), 217-248. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.020>
- Wohl, E., Barros, A., Brunzell, N., Chappell, N. A., Coe, M., Giambelluca, T., Goldsmith, S., Harmon, R., Hendrickx, J. M. H., Juvik, J., McDonnell, J., Ogden, F. (2012). The hydrology of the humid tropics. *Nature Climate Change*, 2(9), 655-662. <https://doi.org/10.1038/nclimate1556>
- Wohl, E., Lininger, K. B., Fox, M., Baillie, B. R., & Erskine, W. D. (2017). Instream large wood loads across bioclimatic regions. *Forest Ecology and Management*, 404, 370-380. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.013>
- Yanosky, T. M. & Jarrett, R. D. (2002). Dendrochronologic evidence for the frequency and magnitude of paleofloods. In: House, P. K., Webb, R. H, Baker, V. R. et al. (eds) *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and applications of paleoflood hydrology*. Water Science and Application vol. 5. Washington, D.C.: American Geophysical Union, pp. 77-89.



# Relaciones entre la estructura urbana y la movilidad cotidiana en Ciudad Juárez, Chihuahua, México

Relations between urban structure and daily mobility in Ciudad Juárez, Chihuahua, Mexico

Isaac Chaparro Hernández<sup>1</sup>

*Recibido 8 de agosto de 2022; aceptado 24 de septiembre de 2022*

## RESUMEN

La investigación describe y explica los patrones, costos y límites de la movilidad cotidiana causados por la estructura urbana de Ciudad Juárez. La concatenación de las teorías clásicas y contemporáneas de localización, estructura urbana y movilidad fundamentaron los procesos de análisis y resultados de este estudio. Metodológicamente se implementaron las técnicas de autocorrelación espacial I de Moran y G de Getis-Ord para el análisis de los censos económicos del INEGI, que identificaron espacialmente los subcentros de empleo total, manufactura y terciario en los periodos 1993, 2004, 2009 y 2014. Por otro lado, se realizó un levantamiento bietápico de datos en toda la ciudad por medio de encuestas origen-destino, las cuales mostraron, desde una escala macro, los patrones de movilidad en términos de tiempo, distancia, orígenes, destinos, cantidad de viajes, preferencias de transporte, motivos, edades y costos económicos. En una escala micro, la teoría de grafos y el análisis de redes permitieron modelar espacialmente cada viaje intraurbano, los resultados se detallan en un Atlas de Movilidad que incluye cada una de las 64 unidades territoriales en que se dividió la ciudad. La investigación propone una metodología replicable, además provee información relevante y actual de la ciudad, útiles para otros estudios, toma de decisiones y políticas públicas de estructuración y movilidad urbana.

*Palabras clave: Movilidad urbana, patrones de movilidad, estructura urbana, autocorrelación espacial.*

1 Universidad Autónoma de Ciudad de Juárez, México, correo electrónico: isaac.chaparro@uacj.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-4433>

## ABSTRACT

The research describes and explains the patterns, costs and limits of daily mobility caused by the urban structure of Ciudad Juárez. The concatenation of classical and contemporary theories of location, urban structure and mobility underpinned the analysis processes and results of this study. Methodologically, Moran's I and Getis-Ord's G spatial autocorrelation techniques were implemented for the analysis of INEGI's economic censuses, which spatially identified the sub-centers of total, manufacturing and tertiary employment in the periods 1993, 2004, 2009 and 2014. On the other hand, a two-stage data survey was conducted throughout the city by means of origin-destination surveys, which showed, from a macro scale, mobility patterns in terms of time, distance, origins, destinations, number of trips, transportation preferences, motives, ages and economic costs. At a micro scale, graph theory and network analysis allowed spatial modeling of each intra-urban trip, the results of which are detailed in a Mobility Atlas that includes each of the 64 territorial units into which the city was divided. The research proposes a replicable methodology and provides relevant and current information about the city, useful for other studies, decision making and public policies on urban structuring and mobility.

*Key words: Urban mobility, mobility patterns, urban structure, spatial autocorrelation.*

## 1. Introducción

Por su naturaleza, las dinámicas urbanas modernas son amplias y complejas, desde entender la organización espacial de actividades, hasta el movimiento de personas y bienes dentro de la misma ciudad. Por tal motivo, se debería enfocar cualquier estudio a explorar, caracterizar y explicar los subcentros urbanos, para dejar de producir discusiones que se centran en temas y resultados estancados desde hace mucho tiempo (Garrocho & Campos, 2007). Por tal motivo, el propósito de esta investigación es conocer la relación que genera la estructura urbana de la ciudad con la movilidad cotidiana de las personas, entendido desde los costos y límites que conlleva desplazarse por las vialidades existentes, para llegar a lugares específicos y solventar necesidades como el trabajo, la educación, salud, adquirir productos, servicios, entre otros. La importancia de este estudio no es sólo definir el vínculo entre la distribución de servicios en la ciudad con los desplazamientos urbanos, sino explicar y reflexionar los efectos, desde una perspectiva individual por parte del usuario que viaja, así como desde una escala mayor para ser considerado en la toma de decisiones y en la generación de política pública.

Es claro que existe una relación proporcional entre la población concentrada y el costo de la movilidad (Gakenheimer, 1998). En el contexto de Ciudad Juárez, dicha relación se manifiesta con el 151.6% de expansión de la mancha urbana y un crecimiento de población de 64.6% de 1990 al 2015 (López & Peña, 2017). También la distribución de la industria maquiladora a partir de la década de 1960, que como dato reciente, desde el 2015 al 2017 ha crecido 5%, incluso el parque de vehículos motorizados registrados en circulación también se ha

incrementado 10.7% en el mismo periodo (Plan Estratégico de Juárez, A.C, 2018). Estos fenómenos en crecimiento hacen una estructura urbana dinámica, que necesita ser explorada y caracterizada. En este sentido, dicha reestructuración va de la mano con los costos de congestión, por lo que también los patrones de movilidad cotidiana cambian, pero no pueden ser analizados por la ausencia de información actualizada.

Por lo anterior, se establecieron los siguientes objetivos específicos: El primero buscó identificar las áreas más importantes de empleo, lo que definirá en mayor medida la estructura actual de la ciudad. Para este objetivo, se analizaron los censos económicos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con las técnicas de dependencia espacial. El segundo objetivo es determinar los patrones, costos y límites de la movilidad cotidiana, con datos adquiridos por medio de encuestas origen-destino a nivel vivienda aplicadas en toda la ciudad, y analizados con estadística tradicional y sistemas de información geográfica. Por último, definir un modelo que combine la estructura urbana y la movilidad, construido con la sobreposición de resultados.

El antecedente del problema surge a partir de la competencia del mercado por las mejores localizaciones, la centralidad ha sido la razón principal que reorganiza los centros económicos (Alegría, 1989). Desde el enfoque de los estudios urbanos, no hay evidencia para rechazar la hipótesis acerca de que existe una limitación en la movilidad cotidiana provocada por los costos de congestión causados por la estructura urbana, considerando la teoría de localización como vínculo entre ambas esferas.

Otro problema fundamental es la poca o restringida información de movilidad en la ciudad, incluso la actualización, frecuencia y profundidad de los datos recabados por instituciones, se consideran parte de la problemática, debido a que podría ser un insumo importante que también describiría la estructura urbana, sus dinámicas económicas y la interacción interna. Los efectos de desconocer los patrones de desplazamientos intraurbanos se materializan en una movilidad restringida, y puede ser abordado como una restricción de los derechos humanos para los habitantes de la ciudad (Borja, 2013), en el sentido que todos los costos que absorbe el usuario, han deteriorado las condiciones de la vida cotidiana de la población en general. Respecto a lo anterior, la Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal define el término derecho a la movilidad como: “el derecho de toda persona y de la colectividad a disponer de un sistema integral de movilidad de calidad y aceptable, suficiente y accesible que, en condiciones de igualdad y sostenibilidad, permita el efectivo desplazamiento de todas las personas en un territorio para la satisfacción de sus necesidades y pleno desarrollo” (Comisión Nacional de los Derechos Humanos, 2016, p. 3). Sin duda, la reflexión acerca de la situación actual de la movilidad urbana favorecerá a mejorar las estrategias de planeación y de inversión para un beneficio social.

## 2. Antecedentes

Las teorías de estructura urbana, así como las de localización, tienen un vínculo fundamental con los procesos económicos, cambiantes por la forma de mercantilización de bienes y servicios dependiendo del continente, país o ciudad con su característica propia de sustentabilidad económica. Los modelos clásicos que provienen de Europa y Estados Unidos, tienen aportaciones que dan origen a los cimientos para intentar identificar patrones de empleo y de movilidad. En comparación de los procesos de cambio que experimentan las ciudades europeas o norteamericanas, en Latinoamérica presentan una mayor rapidez de crecimiento y expansión territorial (Ford, 1996), escenario constante sobre todo en las zonas metropolitanas de México.

### 2.1 Modelos de estructura urbana en América Latina

Históricamente las ciudades han evolucionado por lo que es factible hacer una revisión en lapsos de tiempo, (Borsdorf, 2003) hace precisamente un comparativo de la estructura urbana desde la colonización hasta la era moderna con características de fragmentación. Los estudios en Latinoamérica han sido abordados por investigadores europeos que han mostrado interés en comprender la configuración y evolución de las estructuras urbanas. Específicamente se han elaborado en países como Chile (Meyer & Bähr, 2004) y Argentina (Janoschka, 2002), sin embargo, es de interés abordar investigaciones en México y observar si existe alguna relación con los modelos generales de Latinoamérica, los estadounidenses de la Escuela de Chicago o los europeos.

En México se han hecho investigaciones de estructuras urbanas en áreas metropolitanas, con mayor frecuencia en la Ciudad de México, los ejemplos más relevantes son de Aguilar y Alvarado (2004), donde se discute si la ciudad tiene o tendrá una composición multinodal. Graizbord (2008) define la estructura de la misma ciudad por medio de análisis de movilidad urbana. También los análisis de reestructuración y organización de los centros de servicios (Sobrino, 2006) y el análisis de accesibilidad, ingreso y localización residencial (Suárez & Delgado, 2007). Incluso el área metropolitana de Toluca ha tenido interesantes investigaciones referentes a este tema, se distingue la investigación de (Garrocho & Campos, 2007) donde profundizan y proponen alternativas metodológicas para discutir y estudiar la estructura urbana.

El estudio de la estructura urbana en Ciudad Juárez, es relativamente nuevo. Las primeras investigaciones describen los cambios históricos desde la década de 1950. En 1994 ya se discutía la transición de monocéntrica a multicéntrica de la estructura del empleo en la ciudad (Fuentes C., 2001, p. 105). Finalmente, la más reciente investigación de estructura urbana en la ciudad fue de Fuentes y Hernández (2015), donde hacen una identificación de los subcentros de empleo en el periodo de 1994 al 2004.

## 2.2 Estudios de movilidad cotidiana

Una de las herramientas para conocer a detalle los patrones de movilidad y a su vez la demanda de los diferentes tipos de transporte son las encuestas origen-destino (Casado, 2008), con la característica particular del alto costo, motivo fuerte por el cual existe escasa información (INEGI, 2017). En un contexto internacional, estudios relevantes de movilidad con esta metodología se encuentra en países como Chile con el proyecto de EOD Santiago 2012 (Universidad Alberto Hurtado, 2012), y España con el proyecto MOVILIA, desarrollado desde la década de los 80 dejó bases sólidas para el análisis de la movilidad obligada (Ministerio de Fomento del Gobierno de España, 2007).

Los países europeos han realizado este tipo de investigaciones con mayor frecuencia, Miralles-Guasch & Cebollada (2009) explican de forma resumida los siguientes proyectos: *National Travel Survey* en el Reino Unido; Suiza con el proyecto *Swiss Travel Survey*; En Alemania se desarrolla *Mobility in German*; Y Francia con *Enquêtes Ménages Déplacements*. Por otra parte en México está dentro de los países latinoamericanos con información significativa a nivel mundial (Miralles-Guasch & Cebollada, 2009). En la que destaca el INEGI y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con las encuestas origen-destino del Valle de México en el 2017. Por otra parte, han existido otras investigaciones en las que no participa el INEGI, como el caso de Puebla en 1976 y 1983, la Ciudad de México en 1979 y 1984, Monterrey en 1983, Guadalajara en 1985, Tampico-Madero-Altamira en 1998, San Luis Potosí en el 2000 y Distrito Federal en 2004 (Casado, 2008).

En Ciudad Juárez fue hasta mediados de 1992 en que se hizo un estudio vial y de transporte urbano formalmente por parte del Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP). No obstante, la información acerca de proyectos donde han utilizado encuestas origen-destino es muy poca. Se tienen datos acerca de una aplicación en 1997 y 2006 por parte del IMIP, con el objetivo de crear el plan de movilidad ciclista de Ciudad Juárez y el estudio integral de transporte 2006. La más reciente investigación de movilidad encontrada fue de Ortiz (2018), quien discute el impacto que ha ocasionado el BRT en términos de accesibilidad y percepción del usuario.

## 2.3 Modelos de localización

En la actualidad, los modelos y análisis de localización tienen referencias al modelo monocéntrico de Von Thünen (1826), quien recurrentemente es citado en los modernos estudios de la economía urbana, siendo los más significativos el de Wingo (1961) y Lowry (1964), pero con mayor relevancia por Alonso (1960, 1964) quien hace discusiones sobre los primeros estudios de la economía de la tierra urbana, he hizo modificaciones sustituyendo a los viajeros de cercanías por agricultores, y el DCN por una ciudad aislada (Fujita, 2012).

Los estudios más influyentes sobre la economía del uso de la tierra y la renta son de Ricardo (1821) y Von Thünen (1826). La teoría de Ricardo acerca de la renta de la tierra agrícola, se centra en la fertilidad y el suministro fijo de la tierra,

es decir, el valor de la tierra es proporcional a su producción. En contraste, la teoría de Von Thünen basa el valor de la renta de la tierra agrícola en la distancia del mercado. En este sentido, para efectos de esta investigación es relevante la segunda teoría debido a que participa la variable distancia (Parr, 2015), la cual puede ser vinculada con los estudios de movilidad urbana. Hotelling (1929) desde otra perspectiva considera la competencia de mercados, en el que las atracciones por parte de los compradores son afectadas por la localización y la distancia. Por el contrario, el modelo de Christaller (1966) se refiere a la conexión y relación interurbana.

Los estudios de Isard (1956), Beckman (1965) y Wingo (1961) prepararon las bases en las formulaciones respecto al modelo de Von Thünen, pero aplicado en el contexto urbano, emergiendo una nueva escuela llamada "nueva economía urbana" (Capello, 2011). Al entrar la era industrial, las zonas agrícolas ubicadas en zonas rurales tuvieron un equivalente industrial, que también buscaron optimizar sus costos de distribución de productos, por lo que la participación de Weber (1909) fue clave en la época. Por otra parte, Walter Isard (1949, 1956) buscó la relación que existe entre la localización de los sectores de producción con la zona de mercados, idea que lo postuló como un pionero en tratar el concepto del "costo del transporte" o el "problema del transporte" (Chang, 2004), con el que se busca la minimización de costos durante los flujos entre diferentes regiones.

## 2.4 Movilidad, distancia y fricción

La relación entre la estructura urbana, caracterizada por localizaciones de objetos de estudio, y el transporte tradicionalmente ha sido vista como causalidad, con una idea de que un concepto predetermina a otro (Cerdá & Marmolejo, 2010). Al profundizar Miralles-Guasch (2002) sostiene que la estructura física de la ciudad produce una demanda de movilidad, pero simultáneamente la oferta del transporte impacta en la localización de las actividades. Se observa desde las teorías de la localización cómo la distancia es un factor importante para encontrar una posición estratégica que beneficien las utilidades económicas para empresas e industrias, no obstante, este escenario es posible extenderlo hacia el hogar y la movilidad particular desde su localización.

En la revisión bibliográfica se encontraron estudios de ciudades desarrolladas, con alta densidad de población, problemas de movilidad y de contaminación, por ejemplo: Londres, Madrid, Ciudad de México (Rivas *et al.*, 2007), Perú, Chile, Nigeria, Tanzania, Tailandia y Colombia (Hidalgo D., 2005), Copenhague (Naess, 2006). Incluso en Ciudad Juárez se ha hecho este tipo de estudios por parte del IMIP y otras instituciones dedicadas al transporte (Ortega, 2016), también por académicos e investigadores se han desarrollado estudios de accidentes viales (Hernández, 2012) (Hernández-Hernández & De Haro-De León, 2014) (Hernández & Fuentes, 2014) y flujo vehicular de la industria (Avelar-Sosa *et al.*, 2014).

## 2.5 Movilidad cotidiana

El concepto ha cambiado con el paso del tiempo, sin dejar a un lado la esencia del movimiento de las personas de un lugar a otro abordado desde la etnología con el término de nómada. De manera general existen dos formas de realizar este tipo de investigaciones: la primera consiste en un análisis enfocado a la migración donde las personas cambian su lugar de residencia por largos periodos de tiempo; mientras que el segundo se concentra en movimientos repetitivos respecto a tiempos cortos y definidos, incluso se realizan varios desplazamientos en un mismo día, conocida como movilidad cotidiana (Zelinsky, 1971). Con lo anterior, es posible construir modelos de movilidad que permiten relacionar los modos de transporte cotidianos, tiempo, costo, motivos y horarios, dentro de una caracterización social (Miralles-Guasch & Cebollada, 2009).

Los métodos de análisis encontrados, tienen diferentes enfoques, donde destacan: la construcción y operación, que estudia la relación de los transportes, las rutas y las formas físicas de conexión, con énfasis en el costo de construcción, adecuación, mantenimiento y costos subsecuentes de operación (White, 1977). Otro método es el estudio de los principios conductistas de los usuarios en una operación vial, la cual incorpora teorías de toma de decisiones, oferta-demanda y psicosociales durante la ejecución de un viaje (Warner & Aberg, 2006) y (Morales-Soto *et al.*, 2010). Desde el enfoque histórico, que explica la expansión de los sistemas de transporte, vías terrestres, evolución económica y social en un tiempo prolongado (Tolley & Turton, 2013). Finalmente, los modelos o métodos cuantitativos incorporan estudios geográficos sobre el transporte, análisis de redes y buscan entender la forma y la complejidad del sistema con fundamento matemático y estadístico, con la posibilidad de crear simulaciones (Rodríguez M., 2000).

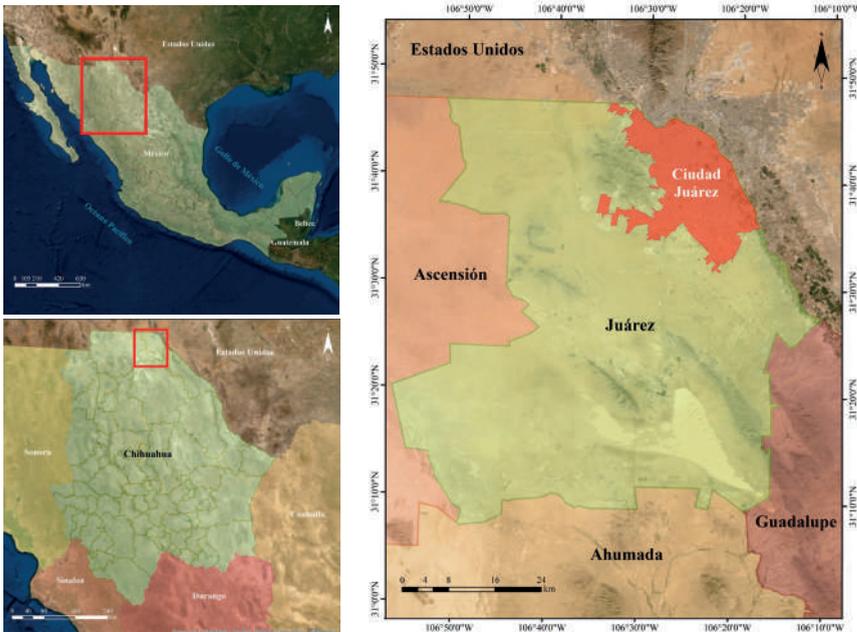
## 3. Metodología

Se propone una combinación de técnicas y métodos que no se han vislumbrado en otras investigaciones consultadas, por lo que se espera que uno de los aportes novedosos sea lo expuesto en este apartado. Cabe resaltar que las técnicas de análisis espacial, recopilación de información en campo y modelos se han utilizado por separado en investigaciones anteriores, por lo tanto, el fundamento original de cada procedimiento se mantiene, solo se ajustaron detalles para alcanzar los objetivos de este trabajo aplicado en el contexto de Ciudad Juárez.

### 3.1 Área de estudio

Ciudad Juárez es parte de la localidad de Juárez, tiene la concentración de población más grande del estado de Chihuahua con 1,391,180 habitantes según datos intercensales, donde el 99% de la población total del municipio está asentada en la zona urbana, además, a nivel nacional es la séptima zona metropolitana con mayor población (INEGI, 2015). Geográficamente se localiza

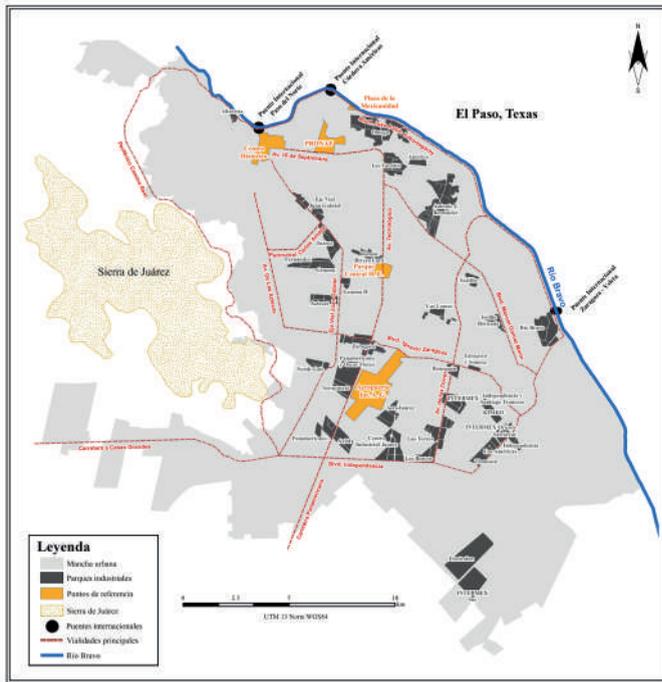
entre las coordenadas  $106^{\circ} 12'$  y  $106^{\circ} 16'$  de longitud oeste a  $31^{\circ} 30'$  y  $31^{\circ} 46'$  de latitud norte. Debido a la ubicación estratégica fronteriza, la ciudad colinda con los estados de Texas y Nuevo México de los Estados Unidos, delimitado por el Río Bravo (véase Figura 1). Debido a su posición geográfica binacional, Juárez cuenta con una composición económica en tres grandes sectores: el industrial con 59%, el comercio y servicios con 37%, y la construcción con 4% (Instituto Municipal de Investigación y Planeación, 2010), por lo que se deduce que Ciudad Juárez es industrializada, evidenciado con las 335 empresas manufactureras en funcionamiento durante el 2017 (Plan Estratégico de Juárez, A.C, 2018, p. 49).



**Figura 1.** Ubicación de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Fuente: elaboración propia con información del INEGI (2015).

Desde la década de 1990 la expansión de la ciudad se vio acelerada hacia el suroriente debido a la localización de nuevas empresas maquiladoras y asentamientos de migrantes provenientes del sur de la república, el fenómeno provocó un crecimiento de la mancha urbana del 52%, es decir, de 233 km<sup>2</sup> en 1995 a 353 km<sup>2</sup> en el 2010 según datos del INEGI (1995, 2010), lo que ha ocasionado un aumento de distancias y tráfico que impacta en la movilidad cotidiana de los habitantes. También a partir de 1990 es notorio el incremento de más del doble del área urbana, influenciado por localización estratégica de nuevas empresas maquiladoras. Para el año 2017 existían 38 centros, áreas y parques industriales ubicados en intersecciones o vialidades primarias, que contenían 335 establecimientos y personal ocupado de 264,490, dedicados específicamente a la industria manufacturera, expuestos en la Figura 2.



**Figura 2.** Puntos de referencia y parques industriales de Ciudad Juárez.  
Fuente: elaboración propia.

Durante el 2018 en el contexto internacional, Ciudad Juárez se ubica en la posición 11 de mayor congestión vehicular en el país y el lugar 581 a nivel mundial, con una velocidad promedio por viaje de 40.2 km/h. En comparación con la Ciudad de México, la cual es la más congestionada del país y la tercera a nivel mundial, se observa una diferencia positiva de 20.9 km/h respecto a los 19.3 km/h en promedio que se invierte dentro de la capital del país, aunque en la comparación se deben considerar las diferencias entre ambas ciudades, como la cantidad de población, extensión territorial, actividad económica y la ubicación geográfica. Como dato relevante, Bogotá, Colombia, es la ciudad más congestionada del mundo con una velocidad de 14.5 km/h de viaje (INRIX, 2020). Para el 2015 se realizaban en el país cerca de 130 millones de viajes cotidianos, con tiempo de promedio de 44 minutos (Suárez & Delgado, 2015, p. 114).

### 3.2 Identificación de subcentros por dependencia espacial

Garrocho y Campos (2007) hacen una revisión extensa y listan cinco métodos para la identificación de subcentros de empleo donde destaca las técnicas de econometría espacial, donde podrían emplearse las autocorrelaciones espaciales. Para llevar a cabo la investigación en Ciudad Juárez, es de interés utilizar las metodologías de movilidad y las técnicas de econometría espacial, específicamente autocorrelaciones espaciales globales y locales.

El análisis de datos estadísticos se llevó a cabo por medio de censos económicos que levanta el INEGI cada 5 años, los cuales cuentan con totales de empleo a nivel AGEB (Área Geoestadística Básica). Por otro lado, se obtuvieron los últimos tres censos económicos desglosados en empleos de manufactura, comercios y servicios de los años 2004, 2009 y 2014. El indicador de densidad empleo por AGEB se describe en la Ecuación 1:

$$E_i = \frac{\text{Total de empleo}}{\text{Hectáreas}} \quad (1)$$

### 3.2.1 Autocorrelación espacial I de Moran

La autocorrelación espacial además de evitar o disminuir los problemas antes descritos, es utilizado para realizar una comparación simultánea de un grupo de datos espaciales representados en polígonos y de los datos contenidos, ejecuta un análisis de patrones y concluye si existe un agrupamiento o no de entidades. El resultado representado con un índice entre -1 a 1 permite determinar el grado de autocorrelación espacial. En el grado en que el índice se inclina hacia el 1 positivo indica una similitud entre entidades colindantes, también conocido como valores calientes o alto-alto; en caso de estar los valores cercanos a cero, se entiende que los patrones mantienen un comportamiento aleatorio o atípico, nombrados bajo-alto o alto-bajo. Por último, entre más se acerque el índice a -1, se idealiza una dispersión o nula similitud entre las zonas vecinas, llamado bajo-bajo.

La Ecuación 2 de I de Moran global es la siguiente:

$$I = \frac{\left(\frac{n}{S_0}\right) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (2)$$

Donde  $S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$  conocida típicamente como la suma de los elementos de la matriz de pesos. Las observaciones  $z$  se refiere a las desviaciones de la media tanto para  $x_i$  como para  $x_j$ ,  $X$  es la variable de la localización de los vecinos. La matriz de pesos está representada por  $W_{ij}$ . En resumen, el I de Moran es la suma de las unidades locales (Celemín, 2009).

### 3.2.2 Autocorrelación espacial G de Getis-Ord

El método es muy semejante a I de Moran global, el cual realiza un análisis de cada unidad territorial con las entidades vecinas, pero con la diferencia en identificar agrupamientos altos y bajos. De esa forma, se realiza una sumatoria de los valores de la unidad de análisis con sus vecinos y se compara con la suma total de todas las identidades que participan en el estudio. Finalmente se identifican los valores más diferenciados que no estén dentro de un parámetro de azar, por lo que adquiere una significancia estadística que da claridad a la relevancia del resultado (Getis,

2007). Existe una tercera interpretación donde el índice no identifica unidades espaciales con vecinos semejantes y las etiqueta con valores bajo-alto o alto-bajo. En la Ecuación 3 se expone la versión global G, en ella se aprecia que la unidad central de análisis no se considera, restricción definida en  $i$  es diferente a  $j$ :

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j} ; i \neq j \quad (3)$$

### 3.3 Encuesta origen-destino

La diferencia entre el levantamiento del INEGI (2017) con la que se plantea en este documento radica en la escala de la movilidad, es decir, en el proyecto de la Zona Metropolitana del Valle de México se analizan los viajes desde los municipios conurbados hacia la Ciudad de México y viceversa, mientras que en la propuesta para el estudio de Ciudad Juárez se levantó información a nivel intraurbano y observar la movilidad entre sectores internos de la ciudad llamados Unidades Territoriales de Análisis, determinados por una investigación que se detallará más adelante. En ese sentido, las unidades de observación contemplan únicamente las viviendas habitadas de la ciudad, dentro de cada vivienda es posible encontrar uno o varios hogares que comparten el mismo gasto familiar. Por último, dentro de cada hogar se analizan los integrantes, quienes hacen varios viajes a lo largo del día para realizar sus actividades cotidianas.

#### 3.3.1 Muestra localización y factores de expansión

El tamaño de la muestra se calcula a partir del Censo de la Población del 2010 del INEGI para Ciudad Juárez, donde se cuentan 361,470 viviendas habitadas particulares y colectivas, distribuidas de forma irregular dentro de los 637 AGEB. La cantidad de viviendas se considera como población finita, dato incorporado dentro de la fórmula estadística para calcular el tamaño de la muestra a levantar (Ecuación 4):

$$n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N-1) + Z_a^2 \times p \times q} \quad (4)$$

Donde:

$n$  = Muestra

$N$  = Población finita

$Z_a^2$  = Nivel de confianza

$p$  = Probabilidad a favor

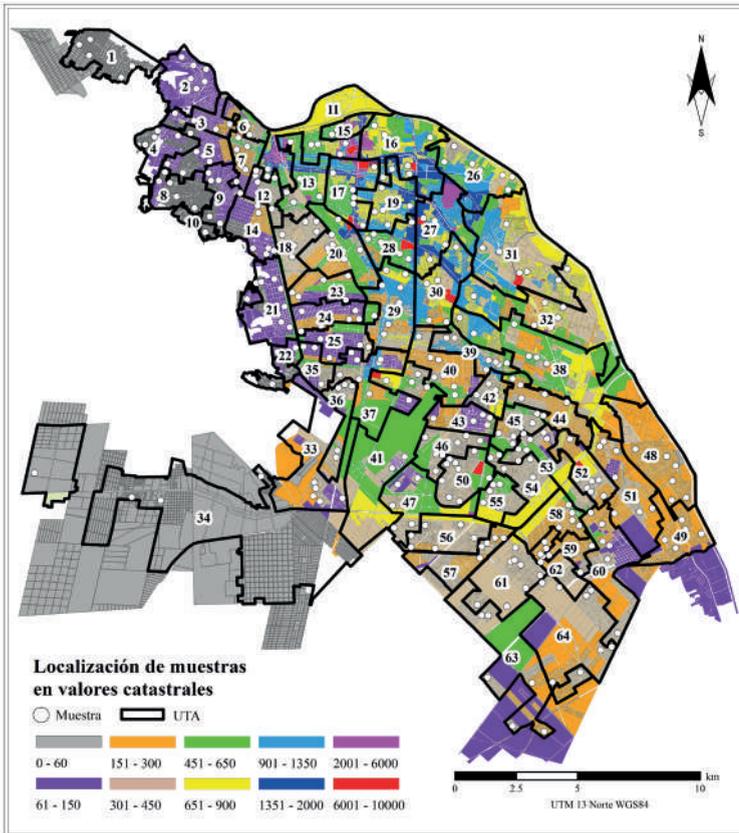
$q$  = Probabilidad en contra

$d^2$  = Margen de error

Se realizaron varios escenarios para determinar la cantidad de muestras y evaluar el recurso tanto económico como de tiempo para ejecutar el levantamiento en campo de datos, por lo que se optó por utilizar un nivel de confianza del 95% equivalente a un valor  $z$  de 1.96 y un margen de error de 5%. Debido a que no se tiene información previa de probabilidades a favor y en

contra, se toma el valor crítico para ambos, de 0.5 o 50% de aleatoriedad. De esta forma resulta un tamaño de muestra de 384 viviendas habitadas a visitar como mínimo, para cumplir con una cobertura geográfica en toda la ciudad.

La formación de las UTA surge en una investigación acerca de la medición multidimensional de la pobreza en Ciudad Juárez, donde se analizan las características de las viviendas y se refleja en una serie de agrupaciones por su similitud. Los estratos contienen características sociodemográficas determinadas a partir del ingreso (Fuentes *et al.*, 2018). El resultado es la división de la ciudad en 64 UTA (véase la Figura 3). Una vez definida la estratificación, se desglosan las 361,470 viviendas habitadas por cada AGEB (INEGI, 2010), posteriormente se suman los valores para obtener la cantidad de viviendas por UTA. Después se calculó el porcentaje que representa cada UTA respecto al total de viviendas habitadas y por último se distribuyen los 384 domicilios de la muestra con base al porcentaje de representatividad como se indica en la Figura 3.



**Figura 3.** Localización de zonas de muestreo a partir de valores de suelo por UTA. Fuente: elaboración propia.

Por último, en el análisis de los datos se requerirá extrapolar los resultados de las encuestas a cantidades aproximadas a la realidad, por lo que es necesario utilizar factores de expansión que multiplican a cada variable obtenida en el muestreo dentro de cada UTA. La expresión aplicada es la Ecuación 5:

$$FE = \frac{Vh}{m} \quad (5)$$

Donde:

FE = Factor de expansión

Vh = Viviendas habitadas dentro de la UTA

m = Muestra estadística dentro de la UTA

### 3.4 Algoritmo de Dijkstra

Los datos fueron capturados en ArcMap 10.6 para determinar líneas de deseo e isócronas de tiempo con la implementación de análisis de redes. ArcMap se basa en el algoritmo de Dijkstra para analizar las líneas de deseo e isócronas (ESRI, 2019). Los pasos secuenciales determinan la obtención de los caminos más cortos según los atributos y restricciones que definen el grafo (Dijkstra, 1959). El insumo principal para realizar el análisis fue la red vial de la ciudad, obtenida de la base de datos libre OpenStreetMap (Mikou *et al.*, 2019). Los parámetros se actualizaron mediante la consulta de Google Maps y Google Street, se le asignó la velocidad máxima, tiempo de recorrido, sentidos de desplazamiento, jerarquía y restricciones a los 74,237 vectores que compone la red vial de Ciudad Juárez. El modelo se calibró con los resultados de las encuestas y con ello se determinaron los tiempos y distancias reales de cada viaje modelado.

### 3.5 Líneas de deseo e isócronas de tiempo

Dentro del estudio de líneas de deseo se analiza la centralidad y la conectividad del origen con los destinos (Vecslir *et al.*, 2017), así mismo se incluyen la cantidad de viajes en porcentaje que surgen a partir del centroide de cada UTA con la impedancia de distancia (Seguí *et al.*, 2003). El análisis de isócronas asocia las particularidades de la red vial para determinar el tiempo en que tardaría una persona en desplazarse dentro de la mancha urbana y su área de alcance (López & Peña, 2017). Con la opción New OD Cost Matrix dentro de la herramienta Network Analyst, se configuraron las propiedades del viaje, donde se le asignó la impedancia distancia y que tome en cuenta la jerarquía y los sentidos de cada vialidad. Por otra parte, las isócronas fueron generadas con la opción New Service Area también dentro de la herramienta Network Analyst con la misma configuración que las líneas de deseo.

## 4. Resultados y discusión

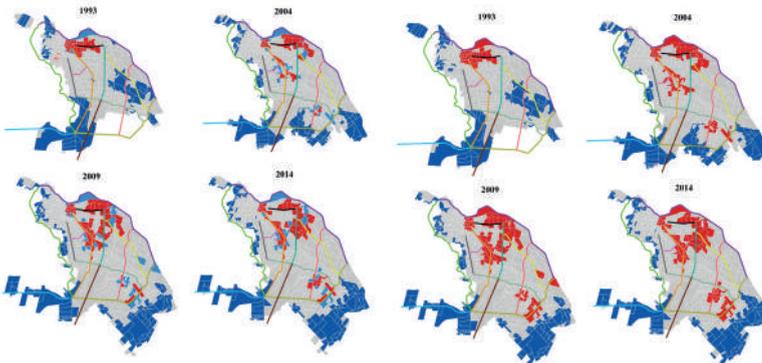
La aplicación de I de Moran global y G de Getis-Ord fue para cada censo económico, con la intención de conocer cada periodo de manera particular y posteriormente compararlos entre sí. Los resultados se muestran en la Tabla 1 para el análisis de empleos totales:

**Tabla 1.** Resultados de I de Moran global para densidad de empleo total

	1993	2004	2009	2014
I de Moran	0.569	0.176	0.189	0.266
Valor esperado	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002
Valor z	26.335	2.921	2.405	2.876
p-valor	0.000	0.003	0.016	0.004
Patrón	Agrupado	Agrupado	Agrupado	Agrupado
G de Getis-Ord	0.048	0.023	0.023	0.037
Valor esperado	0.007	0.010	0.009	0.009
Valor z	4.025	9.195	11.132	6.125
p-valor	0.000	0.000	0.000	0.000
Patrón	Agrupado	Agrupado	Agrupado	Agrupado

**Fuente:** elaboración propia.

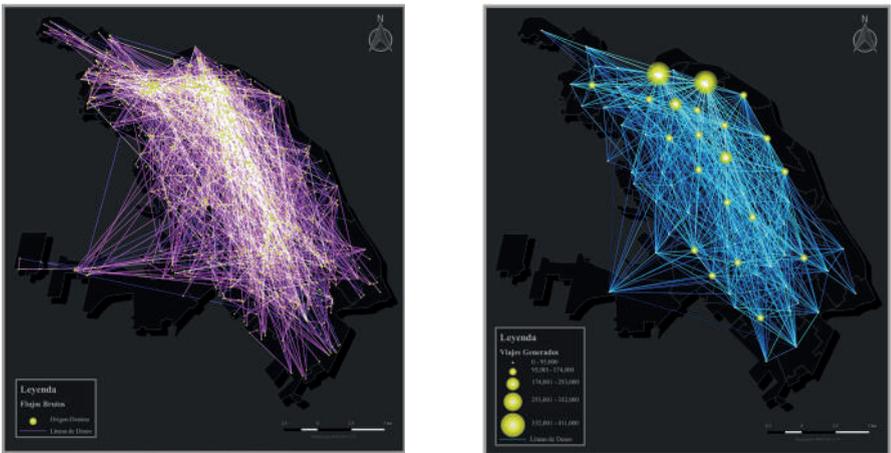
En el año 1993 se obtuvo un índice de 0.569, lo cual indica la existencia de una alta agrupación de empleos totales en la ciudad. En contraste, los años 2004, 2009 y 2014 resultan muy por debajo al de 1993: 0.172, 0.189 y 0.266 respectivamente. En comparación, los resultados del indicador G de Getis-presentan también un patrón agrupado para cada periodo con un p-valor menor a 0.05, incluso confirma que el año 1993 muestra una mejor autocorrelación global que los posteriores. En resumen, ambos métodos en su versión global, afirman que existen agrupaciones de empleo total, terciario y manufacturero. Lo sobresaliente es que los cuatro índices en ambas técnicas son considerados como agrupados, además tienen un p-valor menor 0.05, por lo tanto, existe suficiente evidencia estadística para afirmar que existen concentraciones de empleo en la ciudad dentro de todos los años estudiados. En la Figura 4 se exponen los resultados de la aplicación del análisis espacial por medio del indicador  $G_i$  de Getis-Ord:

**Figura 4.** Resultados I de Moran y  $G_i$  para densidad de empleo total.

Fuente: elaboración propia

### 4.1 Análisis de límites, costos y patrones de la movilidad cotidiana

Como primera aproximación, se modelaron los orígenes y destinos que se obtuvieron en las encuestas, unidos por una línea de deseo que representa el flujo de movilidad entre semana y en fin de semana. En la Figura 5 se muestran del lado izquierdo las localizaciones georreferenciadas con puntos de color amarillo y sus conexiones. En primera instancia, es relevante destacar que se obtuvieron datos en toda la mancha urbana, además, resalta la alta densidad tanto de puntos como de líneas en la parte central de la ciudad, formando una diagonal de norte a sur. Con el fin de simplificar los desplazamientos, en el mapa de la derecha se aglomeraron todos los orígenes y destinos de cada UTA, localizados en el centroide geográfico, representado por el tamaño de los puntos amarillos según la cantidad de viajes generados. Se aprecia que existen dos círculos al norte que distinguen las dos UTA con mayor importancia de atracción de movilidad (120,000 a 420,000 viajes).



**Figura 5.** Conectividad de viajes, georreferenciado y sintetizado.

Fuente: elaboración propia.

La totalidad de registros por UTA se extrapolaron con la aplicación de factores de expansión con la fórmula 5, los resultados globales indican que se realizan 3,248,570 viajes en un día entre semana y 2,594,081 para un día del fin de semana, estas cifras consideran todos los motivos y modalidades de transporte. En este sentido, los valores de movilidad cotidiana entre semana se pueden comparar con lo mostrado en el PDUS del 2016, el cual indica que en Ciudad Juárez se realizan 3,900,000 viajes diarios, sin embargo, no se especifica mayores detalles de cómo se obtuvieron esos resultados. De manera general, 57.73% de los desplazamientos los realizan mujeres, mientras que los hombres 48.27%. Las encuestas dieron patrones acerca de los viajes entre semana que son realizados por motivos de movilidad obligatoria, como ir a trabajar y estudiar. Por el contrario, los viajes hechos en fin de semana se enfocan a

realizar actividades que no requieren horarios obligatorios como entre semana, tal es el caso de viajar para ir de compras o realizar actividades de recreación.

A manera de resumen, la Tabla 2 promedia los resultados de tiempo y distancia real por viaje, además del gasto semanal y el porcentaje del gasto destinado a la movilidad que representa del ingreso familiar, aplicado en cada modalidad. Los promedios dan un panorama diferente pero también válido para entender las dinámicas de movilidad en la ciudad. En términos de tiempo y distancia, cotidianamente caminar tiene un promedio de 12 minutos en distancias de 910 metros, mientras que el mayor tiempo invertido se realiza en camión escolar con 42 minutos en 13.78 km, incluso se utiliza el transporte de personal que en promedio utiliza 36 minutos en 10.31 km. Estos tres tipos de modalidades están íntimamente relacionadas a las actividades escolares y laborales, los cuales se ven afectados por las horas pico, periodo de tiempo donde la demanda de movilidad se incrementa y repercute en el aumento de tiempo en el trayecto, tal y como se discutió anteriormente.

**Tabla 2.** Inversión promedio por modalidad de transporte

Modalidad	Tiempo de un viaje (minutos)	Distancia de un viaje (km)	Gasto semanal en transporte	Porcentaje del ingreso	Ingreso semanal
Automóvil	22	7.40	\$342.59	12.82%	\$2 672.87
Bicicleta	23	4.92	Sin registro	Sin registro	Sin registro
Caminar	12	0.91	Sin registro	Sin registro	Sin registro
Camión escolar	42	13.78	Sin registro	Sin registro	Sin registro
Camión ruta	34	8.94	\$123.77	12.84%	\$964.04
Motocicleta	27	9.35	\$241.62	20.47%	\$1 180.57
Taxi	19	4.44	\$183.33	10.27%	\$1 785.71
Transporte de personal	36	10.31	Sin registro	Sin registro	Sin registro
Uber	19	6.61	\$206.81	11.93%	\$1 733.16
ViveBús-Ecobús	25	7.55	\$219.24	11.03%	\$1 987.91

**Fuente:** elaboración propia.

El gasto del transporte que repercute en el ingreso familiar es muy parecido en los medios motorizados, a excepción de la motocicleta. Al relacionar el gasto semanal con la afectación del ingreso se deduce que, en promedio, los que cuentan con automóvil tienen una mayor solvencia económica frente a los que utilizan los demás modos de transporte. En contraparte, las personas que utilizan el camión o ruta, motocicleta, bicicleta, transporte de personal y caminan tienen recursos económicos limitados que no les facilita poseer y mantener un automóvil. Por supuesto, estos argumentos son desde una visión general, seguramente existen casos que salen del escenario expuesto. Con este análisis se confirman los argumentos de Haig (1926), Isard (1956), Naess (2006) y Valdivia *et al.* (2009), que efectivamente, el simple hecho de viajar tiene un impacto en el presupuesto económico, tiempo y tipo de transporte del consumidor, y su grado de movilidad dependerá de su capacidad económica, de energía y herramientas disponibles. En este sentido, al combinar estas tres

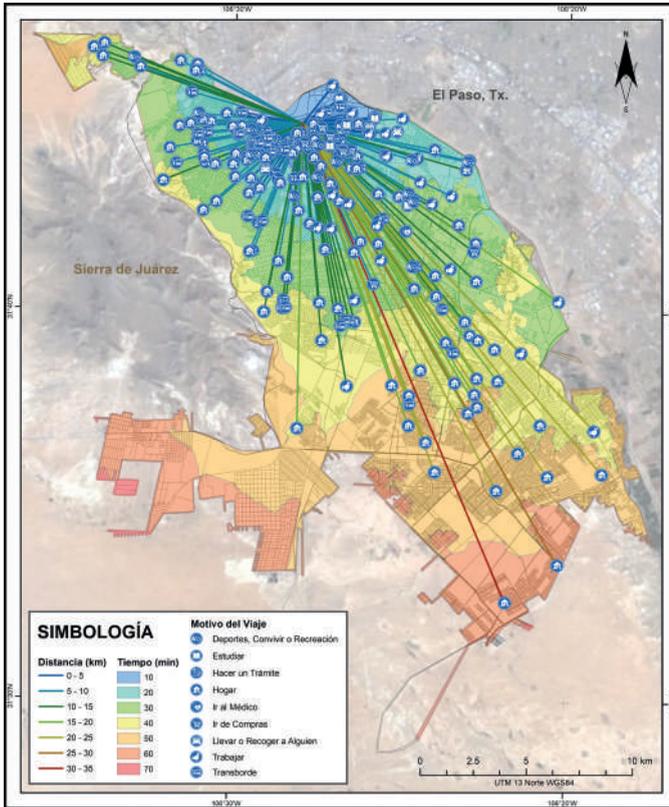
variables junto a la localización del hogar conforman la columna vertebral de la dinámica de la movilidad intraurbana, si bien en la teoría se habla de analizar fricciones de manera individual, con estos resultados se enfatiza que se deben combinar y analizar en conjunto para obtener una aproximación hacia la realidad de los desplazamientos.

## 5. Conclusiones

Definir una estructura urbana a partir de la movilidad cotidiana es posible desde dos escalas, la macro donde se analizan de forma global los resultados y se buscan patrones que describan las dinámicas de desplazamientos, así como los puntos más importantes de la ciudad, con la característica de tener una mayor atracción y/o generación de viajes. La segunda escala se enfoca a lo micro, en el estudio de las características de la zonificación propuesta, en este caso las unidades territoriales de análisis. Por lo tanto, las dinámicas de movilidad cotidiana se observan con mayor detalle y solo describe la zona en específico, que seguramente será diferente a las demás. Se invita al lector a consultar el Anexo A del documento original (Chaparro, 2020), referente al Atlas de Movilidad generado a partir del algoritmo de Dijkstra calibrado, donde se muestra para cada UTA un mapa de isócronas de tiempo y líneas de deseo, que representan las distancias recorridas cotidianamente por las personas para llegar a sus destinos, un ejemplo de ello se expone en la Figura 6.

El planteamiento de la hipótesis se discute desde dos perspectivas: la micro expone que la mayoría de las UTA tienen un comportamiento de movilidad más activo dentro de la misma, donde la mayoría de las personas buscan realizar las actividades esenciales lo más cercano posible a sus hogares. En datos numéricos, esto se comprueba por el tiempo que dedica cada persona en moverse y la distancia que está dispuesta a recorrer, según los modos de transporte disponibles. En la escala macro se observa la ventaja de la localización de la vivienda respecto a los centros de empleo de la autocorrelación espacial y de las áreas de mayor movilidad, por lo que las viviendas que se encuentran en el eje vertical de mayor movilidad tendrán ventaja en la cercanía de lugares donde pueden solventar sus necesidades. Por el contrario, las viviendas localizadas en la periferia tendrán que realizar viajes más largos. En términos económicos, las localizaciones dentro de áreas de mayor movilidad tendrán una renta mayor con un costo bajo en los desplazamientos, mientras que los más alejados, tendrán una renta menor que aumenta el costo del transporte.

Seleccionar y analizar la misma variable con índices de I de Moran y G de Getis-Ord, generó una discusión interesante en torno a la similitud de los resultados y sus diferencias metodológicas, pero con el argumento del complemento. Se concluye que utilizar más de una técnica de autocorrelación espacial mostrará un panorama más completo en agrupaciones de la variable analizada. Sin duda, se recomienda e invita a no restringirse en el uso de una sola técnica, así buscar relaciones entre ellas y construir un solo resultado explicativo.



**Figura 6.** Patrones de movilidad UTA 11 del atlas de movilidad.  
Fuente: elaboración propia.

Una vez planteadas las limitaciones y alcances de utilizar encuestas origen-destino, para definir una estructura urbana autores como Garrocho & Campos (2007), Fuentes & Hernández (2015), Siabato & Guzmán-Manrique (2019), Chaparro & Hernández (2020), entre otros, proponen el uso de la autocorrelación espacial, que efectivamente su adquisición de información es por mucho, más sencilla y barata que la aplicación de encuestas. Los hallazgos en esta investigación refutan a Ford (1996) referente a que el modelo monocéntrico impera en las ciudades latinoamericanas, indicativo que no es una estructura constante ni totalmente monocéntrica como lo sugerían Von Thünen (1826), Burgess (1925), Alonso (1964) y otros. Sin embargo se encuentran algunas similitudes con los modelos clásicos de Hoyt (1966) y Harris & Hullman (1945) en términos de sectores y dispersión. Recordar que estos modelos están más relacionados con las propuestas latinoamericanas modernas que exponen Mertins (2000) y Janoschka (2002), quienes muestran un DCN principal con una descentralización de la estructura urbana.

En términos de patrones de movilidad cotidiana, se descubrieron interesantes fenómenos, por ejemplo, el uso irracional del automóvil, que se evidencia por el tiempo y la distancia en viajes cortos; por otra parte, la segunda forma de movilidad es caminar, esto podría retomarse como discusión dentro de los temas de la ciudad caminable y el mejoramiento de la infraestructura peatonal; en el tercer lugar de importancia se encontró el servicio de transporte público, figurando como indispensable para las personas que no cuentan con suficientes ingresos para adquirir y mantener un vehículo propio, por lo tanto, los resultados que describen a este modo de transporte podrían ser utilizados para mejorar el sistema de transporte público actual.

Los costos, en términos económicos, de tiempo y distancias reales dan un panorama de la situación que atraviesan las personas según la ubicación de su vivienda y las actividades obligatorias que realizan cotidianamente. El tema asume mayor relevancia para la población que vive en la periferia, debido a que invierten mayor costo de tiempo y distancia, aunado a la calidad del servicio de transporte público, por tales motivos, los resultados aquí encontrados serían de utilidad en la creación o mejoramiento de políticas públicas destinadas al transporte público, infraestructura y planificación urbana, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los usuarios.

En Ciudad Juárez no existe un programa que trate exclusivamente de movilidad, por lo que se propone crear o buscar ejemplos como el Programa Integral de Movilidad del D.F. 2013-2018, el cual tiene las bases para implementar política pública con fundamentos ecológicos, de accesibilidad, seguridad, inclusión, calidad y tecnología, tanto para movilidad particular como para mercancías. Lo anterior podría ajustarse a las necesidades locales, incluso ser mejorado para orientar e implementar acciones en el marco de la planeación, centrada en las múltiples formas en las que otros estudios de movilidad contribuyan y complementen el aquí mostrado, por ejemplo, en el área de movilidad de grupos vulnerables, turísticos, *commuting* internacional, normatividad, seguridad, entre otros.

Para cerrar, se busca que esta investigación aporte a los estudios urbanos y contribuya a investigaciones en otras áreas de conocimiento diferentes, por mencionar algunos ejemplos, se pueden relacionar los temas de salud, por su importancia actual ya que la movilidad es la forma de transmisión del COVID-19; proyectos de transporte urbano como la segunda ruta troncal del BRT; ecológicos por la contaminación causada de los vehículos motorizados; segregación residencial y sus dinámicas de movilidad; comercios informales y su influencia en los desplazamientos locales; planificación urbana; diagnóstico y mejoramiento de servicios de transporte público, entre otros, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la ciudadanía y puedan participar dentro del derecho a la movilidad como lo plantea (Borja, 2013), el cual es el medio para acceder a otros derechos fundamentales como al trabajo, la educación y esparcimiento.

## Bibliografía

- Aguilar, A. G., & Alvarado, C. (2004). La reestructuración del espacio urbano de la Ciudad de México: ¿Hacia la metrópoli multinodal?, en Adrián Guillermo Aguilar (coord.), *Procesos metropolitanos y grandes ciudades*. México: Instituto de Geografía, UNAM/Miguel Ángel Porrúa.
- Alegría, T. (1989). La ciudad y los procesos transfronterizos entre México y Estados Unidos. *Frontera Norte*, 1 (2), 7-37. <https://doi.org/10.17428/rfn.v1i2.1654>
- Alonso, W. (1964). *Location and Land Use*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Avelar-Sosa, L., García-Alcaraz, J., Cedillo-Campos, M., & Adarme-Jaimes, W. (agosto de 2014). Effects of regional infrastructure and offered services in the supply chains performance: Case Ciudad Juárez. *DYNA*, 81(186), 208-217. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.39958>
- Beckman, N., & Ingraham, P. (1965). The states and urban areas. *JSTOR*, 76-102. <https://doi.org/10.2307/1190686>
- Borja, J. (2013). *Revolución urbana y derechos ciudadanos*. Madrid: Alianza.
- Borsdorf, A. (2003). Cómo modelar el desarrollo y la dinámica de la ciudad latinoamericana. *Revista Eure*, XXIX (86), 37-49. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612003008600002>
- Burgess, E. (1925). The growth of the city: an introduction to a research project. *The Trend of Population*, 35-41. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_5)
- Capello, R. (2011). Location, Regional Growth and Local Development Theories. *AESTIMUM* 58, 1-25. <https://doi.org/10.1400/179189>
- Celemín, J. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*, 18, 11-31.
- Cerda, J., & Marmolejo, C. (2010). De la accesibilidad a la funcionalidad del territorio: una nueva dimensión para entender la estructura urbano-residencial de las áreas metropolitanas de Santiago (Chile) y Barcelona (España). *Revista de Geografía Norte Grande* (46), 5-27. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022010000200001>
- Chang, S. E. (2004). Transportation geography: The influence of Walter Isard and regional science. *Journal of Geograph Systems* (6), 55-69. <https://doi.org/10.1007/s10109-003-0122-z>
- Chaparro (2020). *Impacto de la estructura urbana en la movilidad cotidiana de Ciudad Juárez, Chihuahua*. (Tesis). Ciudad Juárez, Chihuahua: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Recuperado de <http://erecursos.uacj.mx/handle/20.500.11961/5733>
- Chaparro, I., & Hernández, V. (2020). La reconfiguración de los subcentros de empleo en Ciudad Juárez, Chihuahua, 2004-2014. *Región y sociedad*, 32, 1-48. <https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1268>
- Christaller, W. (1966). *Central Places in Southern Germany*. (C. Baskin, Trad.) New Jersey: PRETINCE-HALL.
- Comisión Nacional de los Derechos Humanos. (2016). *Movilidad, vivienda y derechos humanos*. México.
- Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 269-271.
- ESRI. (2019). *Algoritmos utilizados por Extensión ArcGIS Network Analyst*. (ESRI, Ed.) Recuperado de ArcMap | ArcGIS Desktop:

- <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/algorithm>
- Ford, L. (1996). A New and Improved Model of Latin American City Structure. *Latin American Geography*, LXXXVI (3), 437-440. <https://doi.org/10.2307/215506>
- Fotheringham, S. (1981). Spatial Structure and Distance-Decay Parameters. *Annals of the Association of American Geographers*, LXXI (3), 425-436. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1981.tb01367.x>
- Fuentes, C. (2001). Los cambios en la estructura intraurbana de Ciudad Juárez, Chihuahua, de monocéntrica a multicéntrica. *Frontera Norte*, 13 (25).
- Fuentes, C., & Hernández, V. (2015). La evolución espacial de los subcentros de empleo en Ciudad Juárez, Chihuahua (1994-2004): un análisis con indicadores de autocorrelación espacial global y local. *Estudios demográficos y urbanos*, XXX (2), 433-467.
- Fuentes, C., Peña, S., & Hernández, V. (2018). La medición multidimensional de la pobreza a nivel intraurbano en Ciudad Juárez, Chihuahua (2012). *Estudios Fronterizos* (19), 1-25. <https://doi.org/10.21670/ref.1801001>
- Fujita, M. (2012). Thünen and the New Economic Geography. *Regional Science and Urban Economics* (42), 907-912. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2011.12.002>
- Gakenheimer, R. (1998). Los problemas de la movilidad en el mundo en desarrollo. *EURE (Santiago)*, XXIV (72), 33-52. <https://doi.org/10.4067/S0250-71611998007200002>
- Garrocho, C., & Campos, J. (2007). Dinámica de la estructura policéntrica del empleo terciario en el área metropolitana de Toluca, 1994-2004. *Papeles de Población* (52), 110-135.
- Getis, A. (2007). Reflections on Spatial Autocorrelation. *Regional Science and Urban Economics*, 37(4), 491-496. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2007.04.005>
- Graizbord, B. (2008). *Geografía del transporte en el área metropolitana de la Ciudad de México* (Primera ed.). México, D.F.: El Colegio de México.
- Haig, R. (1926). Towards an Understanding of the Metropolis: II The Assignment of Activities to Areas in Urban Regions. *Quarterly Journal of Economics*, 402-434. <https://doi.org/10.2307/1885172>
- Harris, C., & Ullman, E. (1945). The Nature of Cities. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 242, 7-17.
- Harvey, D. (1989). *The urban experience*. Oxford: Basil Blackwell.
- Hernández, V. (2012). Análisis exploratorio espacial de los accidentes de tránsito en Ciudad Juárez, México. *Rev Panam Salud Publica*, 31(5), 396-402.
- Hernández, V., & Fuentes, C. (2014). Estudio de los accidentes de tránsito usando modelos de regresión locales para la planificación de la seguridad en el transporte. *Ciencias Administrativas y Sociales, Handbook T-IV: Congreso Interdisciplinario de Cuerpos Académicos*. ECORFAN, 293-305.
- Hernández-Hernández, V., & De Haro-De León, L. (2014). La relación entre la centralidad urbana y los atropellamientos en Ciudad Juárez, México. *Revista Hacia la Promoción de la Salud*, XIX (2), 81-94.
- Hidalgo, D. (Mayo de 2005). Comparación de alternativas de transporte público masivo - Una aproximación conceptual. Dossier *Revista de Ingeniería*, 94-103. <https://doi.org/10.16924/revinge.21.10>
- Hotelling, H. (1929). Stability in Competition. *The Economic Journal*, XXXIX (153), 41-57. <https://doi.org/10.2307/1911955>

- Hoyt, H. (1939). *The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities*. Washington, D.C.: Federal Housing Administration.
- Hoyt, H. (1966). *According to Hoyt: fifty years of Homer Hoyt*. Washington, DC.: Homer Hoyt.
- INRIX. (2020). INRIX 2018 Global Traffic Scorecard. <https://inrix.com/scorecard/>
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación. (2010). *Plan de Desarrollo Urbano*. PDU. Ciudad Juárez, Chihuahua, México: Ayuntamiento de Juárez.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). INEGI. <http://www.inegi.org.mx>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2010). XIII Censo de Población y Vivienda. México
- Isard, W. (1949). The General Theory of Location and Space-Economy. *The Quarterly Journal of Economics*, LXIII (4), 476-506. <https://doi.org/10.2307/1882135>
- Isard, W. (1956). *Location and Space-Economy: A General Theory Relating to industrial location, Market Areas, Land Use, Trade and Urban Structure*. New York: The Technology Press of Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, Inc.
- Janoschka, M. (2002). El nuevo modelo de la ciudad latinoamericana: fragmentación y privatización. *Revista Eure*, XXVIII (85), 11-29. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612002008500002>
- López, J. A., & Peña, S. (2017). La segregación socioespacial en Ciudad Juárez, Chihuahua, 1990-2010. *Región y sociedad* (68), 115-152. <https://doi.org/10.22198/rys.2017.68.a210>
- Lowry, I. (1964). *A model of metropolises*. Santa Monica, California: The Rand Corporation.
- Mertins, G. (2000). Ciudades medianas en América Latina: criterios, indicadores y el intento de un modelo de su diferenciación socio-espacial y funcional. *Espacio y Desarrollo* (12), 11-23.
- Meyer, K., & Bähr, J. (2004). La difusión de condominios en las metrópolis latinoamericanas. *Revista de Geografía Norte Grande* (32), 39-53.
- Mikou, M., Rozenberg, J., Koks, E., Fox, C., & Peralta, T. (2019). *Assessing Rural Accessibility and Rural Roads Investment Needs Using Open Source Data*. Policy Research Working Paper.
- Miralles-Guasch, C. (2002). *Ciudad y transporte*. El binomio imperfecto. Barcelona: Ariel Geografía.
- Miralles-Guasch, C., & Cebollada, Á. (2009). Movilidad Cotidiana y Sostenibilidad, una Interpretación desde la Geografía Humana. *Boletín de la A.G.E.* (50), 193-216.
- Morales-Soto, N., Alfaro-Basso, D., & Gálvez-Rivero, W. (2010). Aspectos psicosociales y accidentes en el transporte terrestre. *Rev Peru Med Exp Salud Pública*, XXII(2), 267-272.
- Naess, P. (2006). *Urban Structure Matters: Residential location, car dependence and travel behavior*. New York: Routledge.
- Ortega, V. (2016). El sistema Bus Rapid Transit en Ciudad Juárez y el derecho a la ciudad. *Chihuahua Hoy*, 455-478.
- Ortiz, K. (2018). *La movilidad urbana como un derecho a la ciudad*. Caso BRT en Ciudad Juárez Chihuahua, 2010-2016 (tesis). Ciudad Juárez, Chihuahua: El Colegio de la Frontera Norte.
- Parr, J. (2015). Exploring the urban system of von Thünen's isolated state. *Regional Science*, XCIV (1), 161-176. <https://doi.org/10.1111/pirs.12057>
- Plan Estratégico de Juárez, A.C. (2018). Informe *Así Estamos Juárez 2018*. Ciudad Juárez, México. Recuperado de <https://asiestamosjuarez.org/informes/informe-asi-estamos-juarez-2018/>

- Ricardo, D. (1821). *On the Principles of Political Economy and Taxation*. Londres: Everyman Library.
- Rivas, L., Chávez, J., & Maldonado, B. (diciembre de 2007). Incentivos y desincentivos en los sistemas de transporte público en Londres, Madrid y Ciudad de México. *Rev. Innovar*, 17 (30), 113-132.
- Rodríguez, M. (2000). *Modelos socio-demográficos. Atlas social de la ciudad de Alicante*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Seguí, J., Ruiz, M., Guaita, F., Escalas, F., & Bauzá, A. (2003). La Planeación de Rutas de Transporte Escolar a Través de un SIG: El Proyecto SIGTEBAL. *GeoFocus* (3), 58-76. <https://geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/23>
- Siabato, W., & Guzmán-Manrique, J. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 1-22. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.76919>
- Sobrino, L. J. (2006). Macroestructuración especial del sector servicios en la Ciudad de México", en Gustavo Garza (coord.), *La organización espacial del sector servicios en México*. México: El Colegio de México.
- Suárez, M., & Delgado, G. (2015). Entre mi casa y mi destino. Movilidad y transporte en México. Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte. México: UNAM.
- Suárez, M., & Delgado, J. (2007). Estructura y eficiencia urbana: accesibilidad a empleos, localización residencial e ingreso en la zona metropolitana de la Ciudad de México (1990-2000). *Economía, Sociedad y Territorio*, VII(23), 693-724.
- Tolley, R., & Turton, B. (2013). *Transport Systems, Policy and Planning: A Geographical Approach*. New York: Routledge.
- Vecslir et al., L. (2017). Reestructuración de la centralidad y movilidad cotidiana en el sur de la Región Metropolitana de Buenos Aires. *Revista Transporte y Territorio* (17), 267-287. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333053372013>
- Von Thünen, J. (1826). *Isolated State* C. Wartenberg (Trans). New York, NY: Pergamon Press.
- Warner, H., & Aberg, L. (2006). Drivers' decision to speed: A study inspired by the theory of planned behavior. *Transportation Research Part F* 9, 427-433. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2006.03.004>
- Weber, A. (1909). *Theory of The Location of Industries* (Reimpreso en 1971 ed.). (C. Friederich, Trad.) Chicago Illinois: The University of Chicago Press.
- White, H. (1977). The Geographical Approach to Transport Studies. *Discussion Pappers in Geography* (1).
- Wingo, L. (1961). *Transportation and urban land*. Baltimore, MD: John Hopkins University Press.
- Zelinsky, W. (1971). The Hypothesis of the Mobility Transition. *Geographical Review*, 61(2), 219-249. <https://doi.org/10.2307/213996>



# Analyzing Segregation of Informal Residents in Latin American Cities' Periphery Using Remote Sensing

Analizando la segregación de los asentamientos informales en la periferia de las ciudades latinoamericanas usando imágenes satelitales

Sonia Morales<sup>1</sup>

*Recibido 19 de septiembre de 2022; aceptado 21 de octubre de 2022*

## ABSTRACT

The urban pattern has changed significantly in Latin American cities over the last decades. Since the 1980s, urban policies have increased the periphery land value, promoting suburbanization that restricted spaces for informal settlers. The study used Landsat imagery to analyze if urban pattern changes in Bogota, Colombia and Sao Paulo, Brazil forced informal settlements to move closer to environmental risk areas or areas with limited mobility. This research used a stratified supervised classification to locate formal and informal developments in 2000 and 2018, followed by multiple criteria evaluation to categorize environmental risk and mobility in the study area. The results revealed that segregation in the periphery of cities is not a generalized pattern in the city periphery but a localized phenomenon encouraged by urban policies.

*Key words: remote sensing, segregation, informal settlements, city's periphery.*

## RESUMEN

En Latinoamérica, los patrones de crecimiento urbano han cambiado significativamente en la última década. Desde los años ochenta, las políticas urbanas han hecho que el valor del suelo la periferia de las ciudades crezca restringiendo el espacio disponible para asentamientos informales. Esta

<sup>1</sup> Department of Geography & Environmental Studies at Northeastern Illinois, University in Chicago, Illinois, USA, e-mail: [smmoralesd@gmail.com](mailto:smmoralesd@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1215-4018>.

investigación usó imágenes satelitales Landsat para analizar los cambios urbanos en Bogotá, Colombia y Sao Paulo, Brasil que forzaron a habitantes informales de la ciudad a desplazarse cerca a zonas de riesgo o áreas con movilidad limitada. El estudio utilizó una clasificación supervisada y estratificada para localizar desarrollos formales e informales seguido por una evaluación de criterio múltiple para categorizar riesgo ambiental y movilidad en el área de estudio. El estudio encontró que la segregación en la periferia de las ciudades no es generalizada, es un fenómeno localizado incentivado por las políticas urbanas.

Palabras clave: *imágenes satelitales, segregación, asentamientos informales, periferia urbana.*

## 1. Introduction

Historically, poor and informal residents settled closer to the urban periphery, in a hierarchical structure in Latin American cities. Land cost is a main factor. The lack of infrastructure and poor public services in the city fringe make the land cheaper, and poor residents take those locations due to the low cost. However, the "best location" in Latin American cities has changed significantly in the last decades. Neoliberal policies, implemented in the '80s, have increased the city's periphery land value, promoting a formal suburban development. New developments for high and middle-class residents still occupied the best locations but are now on the periphery of cities. The social structure is forcing poor residents to relocate to disadvantaged sites.

The research evaluates how high- and middle-class residential areas affected poor residents in the periphery of Bogota, Colombia, and Sao Paulo, Brazil due to urban policies adopted since 2000. The project uses Landsat images and GIS data to locate informal settlements and identify hazardous places. The aim is to visualize the segregation patterns of informal residents from the year 2000 to the year 2018.

### 1.1 Urban Patterns in Latin American Cities Changed by Urban Regulations

In the twenty-first century, neoliberal urban policies, adopted in Latin American cities, introduced zoning boundaries and limited lot by lot city sprawl outside the administrative border. However, those zoning regulations did not limit the population settled illegally in cities. In 2017, the UN Economic Commission for America Latina (CEPAL) informed that at least 30% of the population of Latin American largest cities live in informal settlements (CEPAL, 2018).

In general, the condition of informal settlements has been upgrading over time in Latin American cities (Rocco *et al.*, 2019). Nevertheless, some characteristics are the same in informal settlements over time, such as a disorganized plot, inadequate transportation infrastructure, and deficiencies in sewage and electricity due to an unplanned development (Hardoy & Pandiella, 2009). The vulnerability of poor populations living in informal settlements has

become the central social issue for national governments in Latin America in the last two decades (Allen *et al.*, 2017).

At the national level, Latin American countries created policies, national entities, and planning strategies to manage environmental risk to solve this problem in the late 1990s. At the local level, measures focused on preventing disaster and reducing populations' vulnerability by relocating people to new public housing projects. For example, people living in informal settlements established in high-risk zones were relocated to housing projects, which reduced in numbers the amount of poor people's vulnerability but did not fulfill the social needs of those populations (Hardoy & Pandiella, 2009).

The new market was attractive to private companies who started to suburbanize the city's fringe at the beginning of the century. The purpose of public housing changed and attracted the middle-class, high-class population. The new urban pattern affected illegal residents of the urban fringe. Real estate developers built gated condominiums in former shanty areas (Lopez-Morales *et al.*, 2016). The unequal growth of cities' fringe has an origin in the neoliberal land-use policies incorporated at the beginning of the century. From that moment, the urban fringe developed into an urban structure sprawled but fragmented, and highly segregated, creating a spatial class configuration that affects principally poor residents (Aguilar *et al.*, 2003; Castro-Correa *et al.*, 2015; Gilbert, 1998; Inostroza *et al.*, 2010; Inostroza & Tabbita, 2016).

The new regulations created physical barriers to settling in cities. At the same time, they allowed private big housing projects to surpass urban city limits to accommodate the periphery's social housing demand and reduce urbanization public costs. For instance, Partial Plans in Colombia and the ZEIS program in Brazil exchanged the cost of urbanization for a high-profit margin of new housing in the periphery with private investors. Several researches proved that those private new projects did not improve the living conditions of the marginalized populations (Codina, 2005; Klaufus, 2013). The cost to supply public services in the expansion area was not assumed by the State but by private investors that only supplied their developments. Only the more profitable parts of partial plans were built, and the plan's public services provision was sometimes not executed (Montaña & Borrero, 2015). Consequently, the public transportation system, operated by private companies, did not see profit in routes without proper streets and public adequations.

The public service shortage and minimum transportation access affected principally illegal settlers in the city fringe. One of the reasons is that unplanned houses, informally developed, did not have paved roads or adequate transportation infrastructures, such as sidewalks, bus stops, or feeder routes in illegal neighborhoods (Jaitman, 2015; Yañez-Pagans *et al.*, 2019). Cities invest in public infrastructure mainly in the principal streets or highways (Angotti, 2013), and transportation networks in the periphery of cities are incorporated after urban development is consolidated.

The mobility issues of poor residents in Bogota, Colombia, and Sao Paulo, Brazil, have been studied before. Bogota has an internationally recognized

Bus Rapid Transit (BRT) system, 'Transmilenio,' that improved commute, quality, and security. However, several studies have found that the system is highly exclusionary. Bassett and Marpillero-Colomina (2013) argued that 'Transmilenio' is a gentrifying agent that displaces poor residents from its main stations. Moreno & Miralles-Guasch (2017) indicated that the periphery's service is precarious, 'feeder buses' are limited in some areas. Guzman *et al.* (2017) found that the system is highly unequal. The rationale for locating bus stops and stations depends on the amenities nearby and not serving people who actually need the service.

In Sao Paulo, Brazil, the transportation infrastructure has similar problems. Favelas in Brazil have limited access to public transportation systems due to the overcrowded conditions of neighborhoods. Sao Paulo BRT lines go mainly from the periphery to the city center, not tangentially connecting neighborhoods (Tomasiello *et al.*, 2019). Studies revealed that the BRT system is inefficient, buses are overcrowded, and routes have unreliable schedules (Amparo Alves, 2014; Hyman, 2018). Weak mobility is one of the main problems of people living in informal settlements on the periphery of Latin American cities.

The environmental conditions such as steep slopes, wetlands and rivers within the city, and rainy seasons limit land for settlement in Latin America. Several researchers have studied the vulnerability of informal settlements in high environmental risk areas. Wenzel *et al.* (2007) observed that informal settlements are exposed to environmental hazards due to the low quality of construction and the high density of settlements. Hardoy & Pandiella (2009) found that people living on the fringe of Latin American cities are exposed to more environmental hazards than people living in the center of cities due to their low access to disaster assistance. In the same context, Allen *et al.* (2017) discovered that informal settlements experience higher ecological risk because the poor inhabitants are marginalized in "risk traps" with consecutive small-scale disasters, highly localized and with difficult access. For instance, Informal settlements in Bogota are typically located in the "Cerros," steep slopes situated in the south and east (Maceratini, 2011); Even though the sector consolidated years ago, the access is through small unpaved roads inaccessible to cars, people have to walk an average of 30 minutes to bus stops (Moreno and Miralles-Guasch, 2017). The complex topography and unplanned origin of informal settlements restrict their urban structure and limit the growth connected to the city.

Favelas in Sao Paulo have a similar problem with the transportation network. However, the primary concern of informal settlements in Sao Paulo is that they are located in flooding zones. The environmentally risky location created several problems. On the one hand, public regulations prohibit sewerage installation in flooding locations (Budds & Teixeira, 2005). On the other hand, informal settlements are located on land reserved for forests that cannot be regularized (Silva & Ceneviva, 1996). Additionally, the sprawl of the Sao Paulo Metropolitan Area involves 39 municipalities making it challenging to consolidate a unified policy for informal developments. Finally, the political division of each city

creates barriers to locating and preventing environmental risk outside their political boundary.

In summary, neoliberal policies implemented in many Latin American cities increased spatial segregation in different ways. First, the economic structure of cities increased class inequalities geographically, with a system that mainly benefited the wealthier population. Second, the deregulation of the land market facilitated peripheral suburbanization and created a social problem for poor inhabitants. Finally, service infrastructure in the periphery of cities was constructed unequally, serving principally high and middle socio-economic classes. Therefore, urban policies implemented in cities since the 2000s have focused on economic interest over social justice. The change in the public policy creates a time frame to research the segregation of informal settlements in Latin American cities.

## 1.2 Remote Sensing Images to Analyze Urban Patterns

In Latin America, urban sprawl of cities has been studied mainly through census information (Aguilar *et al.*, 2003; Inostroza *et al.*, 2010; Inostroza, 2016; Inostroza & Tábbita, 2016; Rojas *et al.*, 2013), which focused on the change of population density within the administrative boundary. However, it creates a normative gap in locating informal settlements outside the urban boundary.

The use of satellite images to map slums is widely used. Kohli *et al.* (2012) used very high resolution (VHR) images to create a rapid inventory of the location and physical composition of slums. They were able to explain patterns over time and space using remote sensor data; however, they found that visual interpretation methods required local expertise to produce reliable results. Mahabir *et al.* (2018) indicated that VHR images can capture information in real-time compared with traditional survey methods which are labor-intensive, time-consuming, and may require significant financial support depending on the study area size.

In Latin America, the use of VHR images for mapping informal settlements is scarce. It needs several images to provide city-wide coverage, which increases the cost of the study. The VHR images have a temporal limitation; satellites such as Worldview-1 that cover the area were launched in 2007 which means that VHR images before that date are not available to conduct a temporal analysis of informal settlements' urban growth.

Based on the literature review, remote sensor data are appropriate to measure informal settlements in a city scale. This research explores an inexpensive way to map informal settlements in Latin American cities using moderate resolution images from LANDSAT enhanced with pan-sharpening. The methodology is particularly relevant to raise the interest of studying poverty and informal housing in Latin America beyond public institutions. In addition, the research explores the connection between new developments and informal settlements and how urban regulations may increase Latin American cities' inequality. Identifying this problem will help public institutions

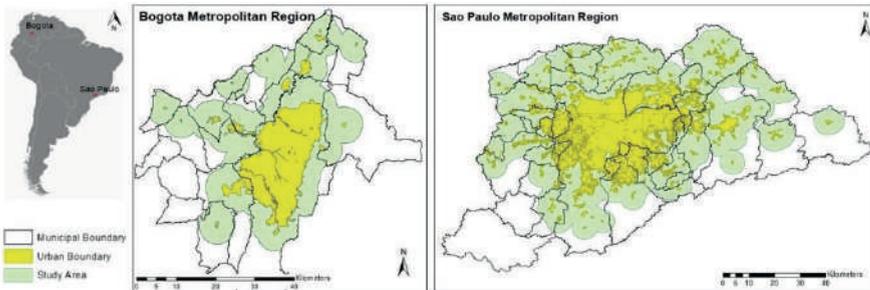
to reframe urban public policies towards better solutions for informality other than displacement.

This study aims to contribute to a better understanding of the spatial segregation patterns in Latin American cities. The research evaluates the growing high and middle-class residential areas in the periphery affecting informal settlements due to urban policies adopted after 2000. Furthermore, the study identified how mobility and exposure to environmental hazards affected informal settlements over time.

## 2. Methodology

### 2.1 Area of study

The research analyzed the change of urban patterns in two Latin American cities; Bogota, Colombia, from 2002 to 2018, and Sao Paulo, Brazil, from 2000 to 2017 (Figure 1). Both municipalities have similarities in topography, economic relevance in their country, and comparable urban growth patterns. Also, they have a concentric and compact city center and a dispersed pattern in the periphery. Additionally, they incorporated the Bus Rapid Transit (BRT) system and introduced neoliberal Strategic Master Plans at the beginning of the 21st century. Finally, both cities' periphery has hazardous environmental conditions such as steep slopes and areas exposed to floods.



**Figure 1.** Study area in Bogota Metropolitan Region and the Sao Paulo Metropolitan Region.

The study aims to identify changes in the area beyond the denominated urban expansion area. The main reason for selecting the margin outside the urban area is that cities prohibit urban construction outside the border, making informal settlements more likely to exist. Therefore, the study applied a four-kilometer buffer from the urban administrative boundary to identify the expansion area used for this study. Additionally, the research excluded towns smaller than 300,000 square meters that are not representative of the study scale.

## 2.2 Methods

The procedure of this study is illustrated by the flowchart shown in Figure 2. The methodology included three sections: an image classification of formal and informal settlements in the study area, rank environmental risk by population, and rank mobility by population. The first section identified the change in urban patterns for formal and informal developments during the study period. The second section identified if the risk level for each settlement has increased or decreased over time. Finally, the third section identified whether each settlement's mobility has changed overtime.

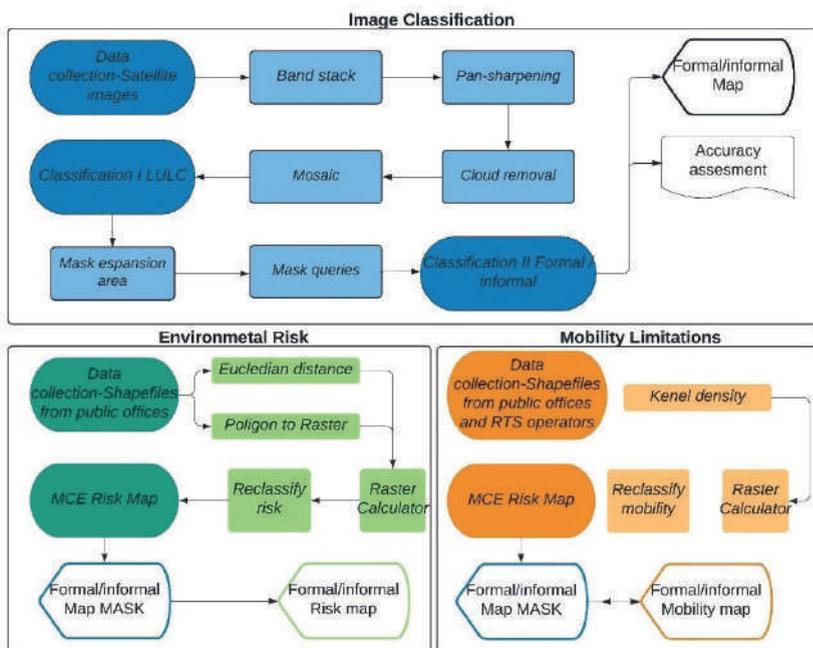


Figure 2. Methodology Flow Chart.

The study's general timeline is from 2000 to 2018, covering the beginning of the implementation of neoliberal urban policies in Latin America. Although cloud cover is an issue in the Andes region, the study used data from adjacent years to get cloud-free mosaics for both cities. Tropical cities are not affected by seasonal changes. For that reason, the study acquired data across seasons to help increase data availability. The image characteristics are described in Table 1.

The image processing was based on a stratified classification process. Initially, a supervised classification using the maximum likelihood algorithm was applied to identify eight land cover types. Once the urban area's land cover classes were extracted, the study applied a second classification to the urban areas to further classify formal and informal settlements. The characteristics of formal development were lots with regular size, square shape, similar roof materials,

urban grid pattern, paved streets with sidewalks, light posts, traffic signs, and electric provision. Informal development training sites were characterized by a small street size, no paved, or non-existent sidewalk organic urban structure, irregular plot size, shapes and highs, and roof materials.

**Table 1.** Characteristics of Landsat data used in this study

<i>Location</i>	<i>Sensor</i>	<i>Path/row</i>	<i>Resolution</i>	<i>Projection</i>	<i>Date</i>
Bogota, Colombia	Landsat 8 OLI_TIRS	008/57	Multispectral: 30m Panchromatic:15m	UTM 18N	2018/12/30
	Landsat 7 ETM+	008/57	Multispectral: 30m Panchromatic:15m	UTM 18N	2001/01/21 2002/02/25 2002/09/21
	Landsat 8 OLI_TIRS	219/76 219/77	Multispectral: 30m Panchromatic:15m	UTM 23S	2017/07/26 2017/07/26
Sao Paulo, Brazil	Landsat 7 ETM+	219/76 219/77	Multispectral: 30m Panchromatic:15m	UTM 23S	2000/04/30 2001/08/30

Once formal and informal areas were classified, the study used a raster-based multiple criteria evaluation (MCE) to identify environmental risk areas. Then, they used Euclidean distance to normalize the data. After that, the researchers calculated the number of pixels according to their risk value using landscape metrics to evaluate risk in informal and formal developments. The study used a similar methodology applied Kernel density instead of Euclidean distance, then landscape metrics to evaluate the mobility of informal and formal developments in the study area.

### 2.3 Accuracy Assessment

The study used an error matrix to assess the accuracy of image classification, using reference data collected from Google Earth's high-resolution images (Table 2). The accuracy assessment was based on stratified random samples. According to each city's location, patch size, and total area, the number of samples increased.

The overall accuracy of all maps varies from 82.9% to 86.7% (Table 2). Although the accuracy assessment showed that informal settlements classification had slightly lower accuracy than formal developments, it is considered adequate for the purpose of this study for comparing the general patterns of informal settlements.

### 2.4 Environmental risk of informal settlements

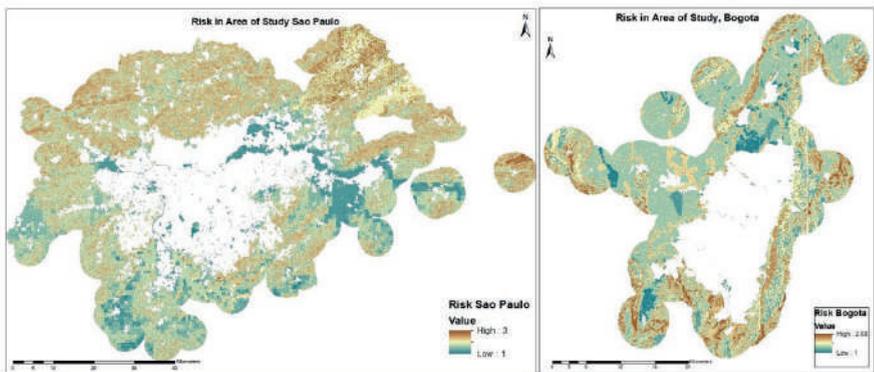
The study used a raster-based multiple criteria evaluation (MCE) approach to calculate environmental risks that affect Bogota and Sao Paulo metropolitan regions (Figure 3). This methodology weighted variables such as proximity to rivers, proximity to wetlands, proximity to forest, and slope to identify an overall risk level.

**Table 2.** Error matrix of accuracy assessment

DATA	Bogota, 2002				Bogota, 2018			
	Reference data				Reference data			
	Formal	Informal	Total	User's accuracy	Formal	Informal	Total	User's accuracy
Formal	33	2	35	94.30%	195	20	215	90.70%
Informal	10	25	35	71.40%	29	91	120	75.80%
Total DATA	43	27	70	82.90%	224	111	335	83.30%
Producer's accuracy	76.70%	92.60%			87.10%	82.00%		

DATA	Sao Paulo, 2000				Sao Paulo, 2017			
	Reference data				Reference data			
	Formal	Informal	Total	User's accuracy	Formal	Informal	Total	User's accuracy
Formal	307	3	310	99.00%	475	25	500	95.00%
Informal	18	52	70	74.30%	134	326	460	70.90%
Total DATA	325	55	380	86.70%	609	351	960	82.90%
Producer's accuracy	94.50%	94.50%			78.00%	92.90%		

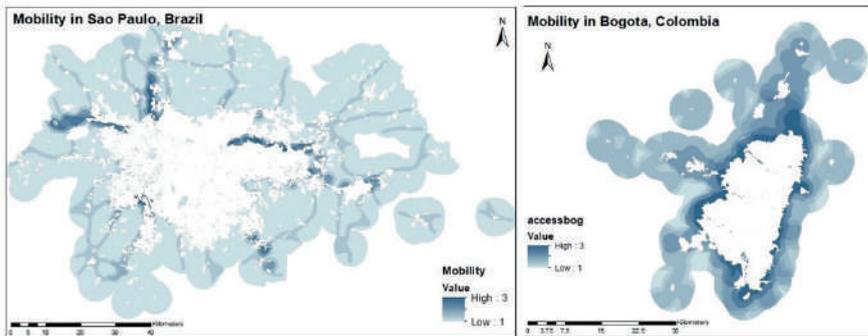


**Figure 3.** Environmentally risk areas in Bogota and Sao Paulo.

The aim was to produce an assessment risk map for the expansion area to measure the settlements' hazardous environmental conditions. The study used Euclidean distance to calculate each criterion to determine risk on a relative scale from 1 to 3, in which 1 represents areas with low risk, 2 represents areas with moderate risk, and 3 illustrates areas with high risk.

## 2.5 Mobility of informal settlements

To measure mobility, this study used data from public transportation systems in each city, including bus routes and stops and main roads connecting metropolitan areas. Both cities have BRT systems, called 'Transmilenio' in Bogota and 'Expresso Tiradentes' in Sao Paulo. The study measured kernel density of bus stops, streets with bus routes, and regional highways to estimate the mobility of informal settlements located in the cities' periphery (Figure 4).



**Figure 4.** Mobility in Bogota and Sao Paulo.

Koch (2013) indicated that people in the suburban favelas in Sao Paulo had to walk over 30 minutes (approximately 2000 m) to bus stops. This study therefore used 2000 m as the average pedestrian distance from home to any transportation system. The methodology applied Kernel density to measure mobility to a scale of 1-3, in which 1 represented the least mobile areas and 3 represent the most mobile areas

## 3. Results

The result focuses on three aspects. First, the study estimated where informal residents are displaced by comparing formal and informal urban settlements over the years. Second, the study evaluated the average environmental risk to identify which population settle in areas with higher environmental risk. Third the research identified where the urban growth (formal and informal) was closer to areas with better mobility.

### 3.1 Formal and informal Urban Development

The results showed that Bogota had a fragmented urban growth from 2002 to 2018 (Figure 5).

Similar to what Inestroza *et al.* (2010) and Lopez -Morales *et al.* (2016) found out, informal development was more fragmented than formal development,

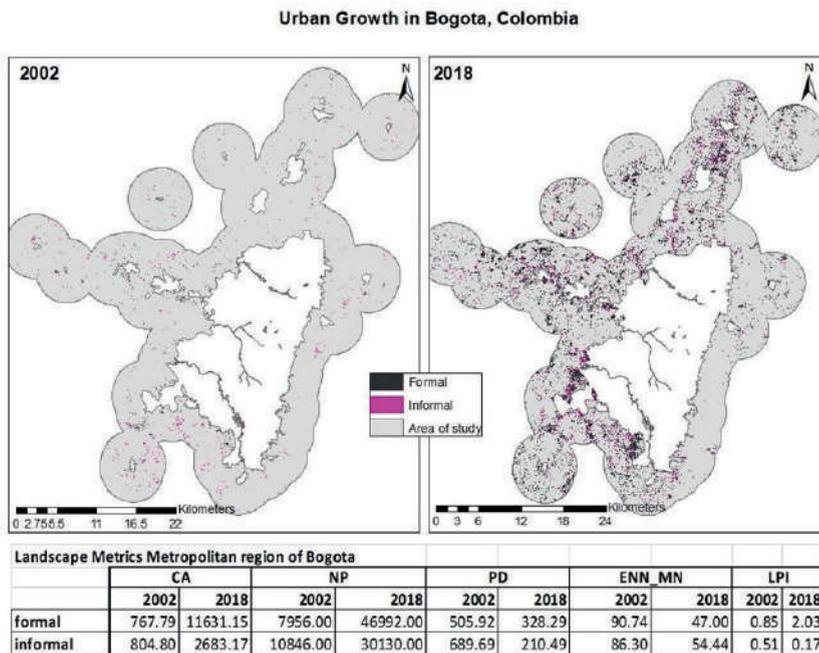


Figure 5. Formal and informal settlements in Bogota, 2002 and 2018.

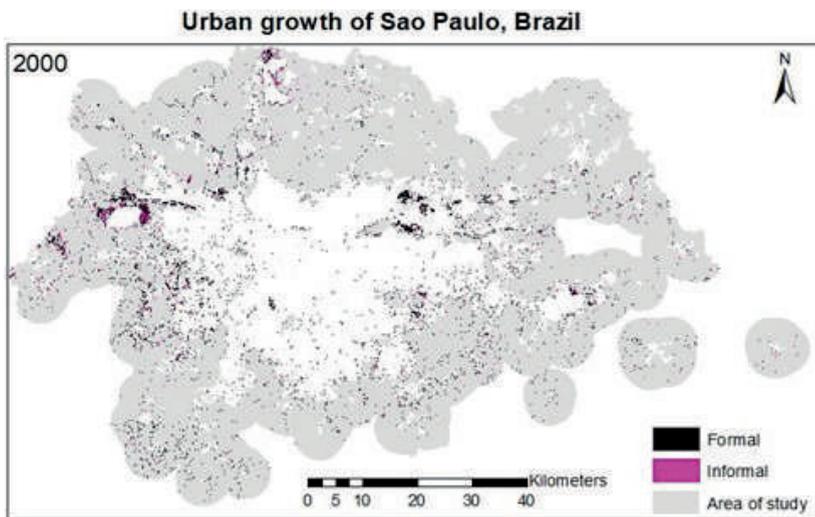
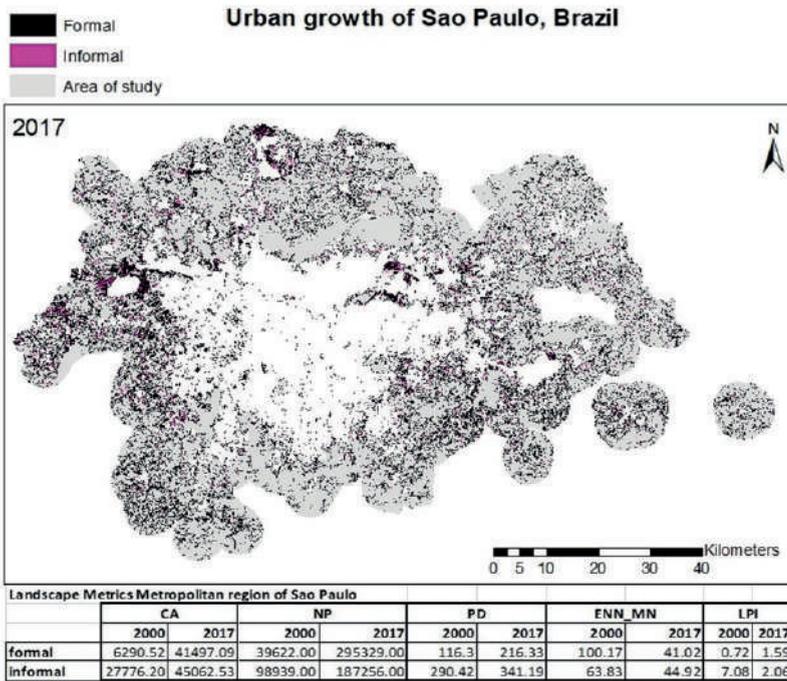


Figure 6a. Formal and informal settlements in Sao Paulo, 2000.



**Figure 6b.** Formal and informal settlements in Sao Paulo, 2017.

which formed bigger clusters due to the suburbanization of the periphery with big housing projects. In addition, informal settlements were located mainly in the south of the metropolitan area, not forming large clusters closer to the main roads. Meanwhile, formal settlements exhibited a dispersed distribution in the expansion area.

In Sao Paulo, the urbanized area increased 2.5 times between 2000 and 2017. the expansion was higher towards the south due to the mountainous topography and forest preserves located in the north (Figure 6). Formal development was higher than informal development. Sao Paulo's urban growth is more continuous than Bogota growing. Formal clusters were located close to commercial and industrial conglomerations on the city's east side. In the same way, Informal developments in Sao Paulo formed more continuous structures than Bogota's informal settlements; but they were located close to main roads and the city limit.

### 3.2 Environmental risk segregation

The results showed in Sao Paulo more formal urban expansion in higher Environmental risk areas. Meanwhile, in Bogota, informal expansion was in areas with lower environmental risk (Table 3).

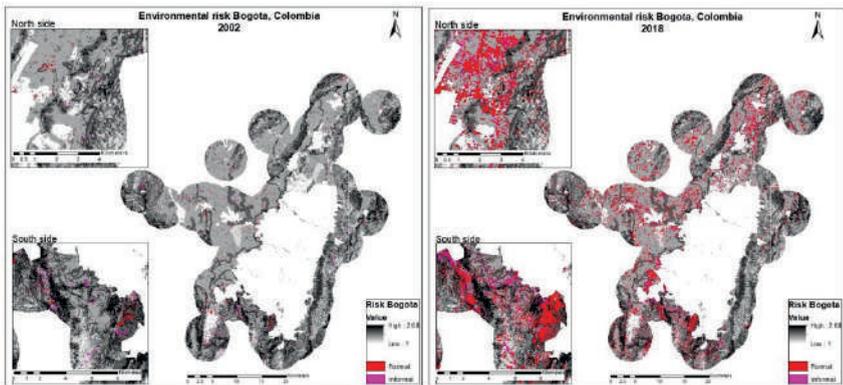
**Table 3.** Statistics of environmental risk in Bogota and Sao Paulo for formal and informal settlements

Bogota's Environmental Risk on a scale from 1 to 3				
	Mean		Standard Deviation (STD)	
	2002	2018	2002	2018
Formal	1.65	1.648	0.23	0.27
Informal	1.75	1.649	0.24	0.27

Sao Paulo Environmental Risk on a scale from 1 to 3				
	Mean		Standard Deviation (STD)	
	2000	2017	2000	2017
Formal	1.68	1.79	0.36	0.39
Informal	1.73	1.75	0.35	0.37

In Bogota, the average environmental risk decreased over the years, which means that recently, more informal settlements built their houses in areas with a lower risk than before (Figure 7). In Sao Paulo, sites exclusively for informal developments in 2000 mixed with predominant formal regions in 2017 (Figure 8a and Figure 8b).



**Figure 7.** Environmental risk for formal and informal developments in Bogota, 2002 and 2018.

In both cities, formal development did not have a preference in location. Formal developments located on the north and east sides of Sao Paulo and the northeast side of Bogota were mainly recreational houses residential buildings with a suburban structure (reticular structure-more vegetation between constructions.) Therefore, other conditions such as the quality of the construction creates extra disadvantages for a high environmental risk that will be included in future research. The spatial analysis of the environmental risk of settlements in Bogota and Sao Paulo indicated that formal settlements did not push informal settlements to riskier areas based on the criteria considered

in this study. In the case of Sao Paulo, the statistic showed an opposite pattern those formal areas settled to locations with higher environmental risk.

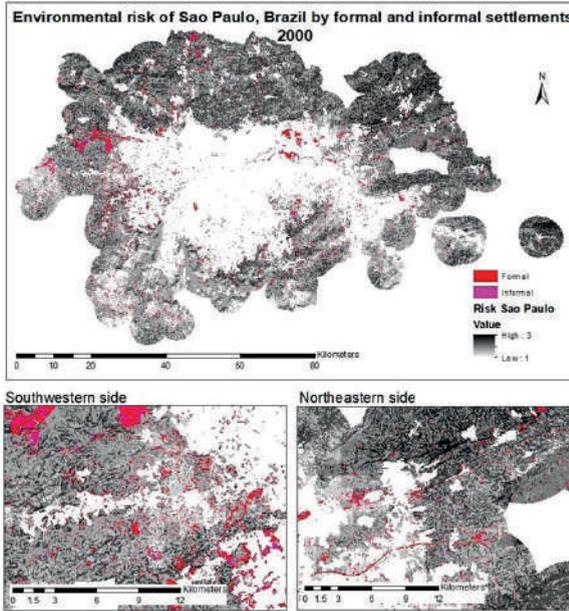


Figure 8a. Environmental risk for formal and informal developments in Sao Paulo, 2000.

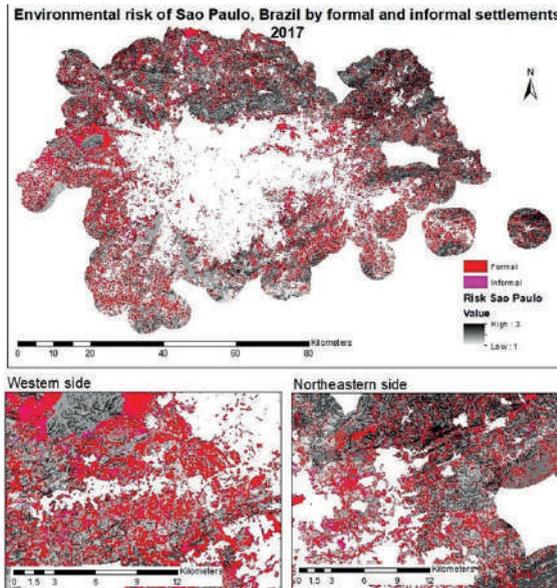
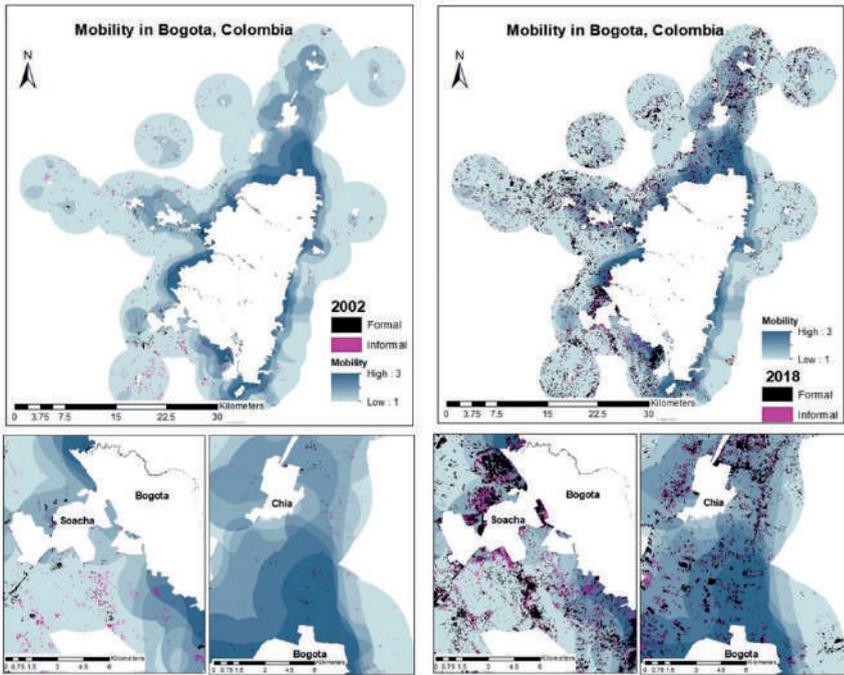


Figure 8b. Environmental risk for formal and informal developments in Sao Paulo, 2017.

### 3.3 Mobility segregation

Mobility of informal settlements improved over time in both urban areas. In general, people settled in areas with better mobility.



**Figure 9.** Mobility for formal and informal developments in Bogota, 2002 and 2018.

In Bogota, formal and informal developments have access to STP bus stops, routes, and highways connecting satellite cities in Bogota's metropolitan area (Figure 9). People in the metropolitan area settle more in areas with higher connection and transportation networks in the north. The mobility in the south is lower than the north. For that reason, urban growth in the south was not as prevalent to areas with high mobility than the north of the city. Still, the south sector had a sprawled formal development, not particularly close to any of the mobility elements analyzed in this study, creating a fragmented structure in the periphery.

The mobility in Sao Paulo shows a radial pattern, connecting satellite towns to the city center (Figure 10). The study showed that development in the periphery is not particularly associated with the BRT or main roads between towns. During the study period, the industrial activity of satellite towns accelerated formal urban development close to informal settlements in specific locations such as Barueri, Jandira, and Itapevi cities in the eastern side of the metropolitan area.

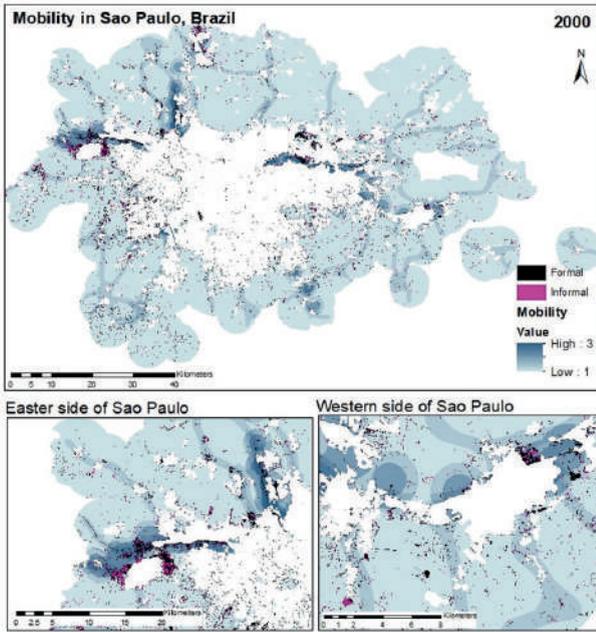


Figure 10a. Mobility for formal and informal developments in Sao Paulo, 2000.

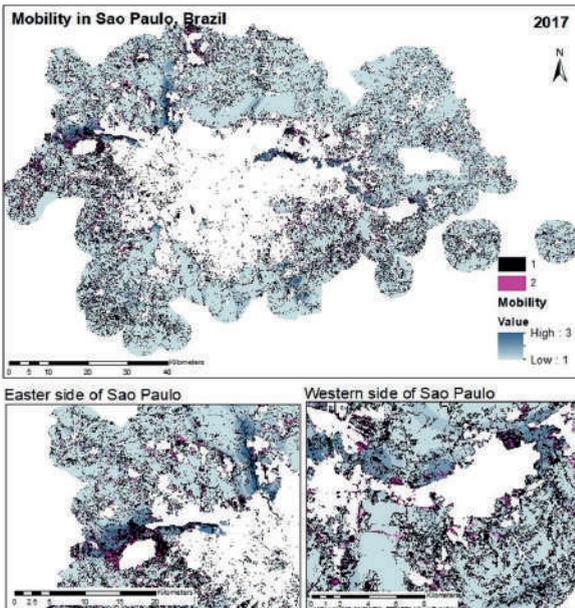


Figure 10b. Mobility for formal and informal developments in Sao Paulo, 2017.

**Table 4.** Statistics of mobility in Bogota and Sao Paulo for formal and informal settlements

Mobility of formal and informal locations in Bogota on a scale from 1 to 3				
	<i>Mean</i>		<i>Standard Deviation (STD)</i>	
	2002	2018	2002	2018
Formal	1.66	1.555	0.237	0.5272
Informal	1.454	1.653	0.245	0.5499
Mobility of formal and informal locations in Sao Paulo on a scale from 1 to 3				
	<i>Mean</i>		<i>Standard Deviation (STD)</i>	
	2000	2017	2000	2017
Formal	1.69	1.47	0.64	0.56
Informal	1.64	1.56	0.62	0.59

The Table 4 shows that mobility of poor residents has improved over the time. However, specific locations showed outlier patterns. For example, the industrial area at the west of Sao Paulo was populated principally by informal settlements in 2000, while formal developments had the most mobile locations in 2017. In Addition, in the south of Bogota, formal developments in 2018 occupied areas with the best mobility, and informal settlements are located in areas with low mobility. Nevertheless, those specific cases are beyond the scope of this research and a further study might be performed to prove a specific segregation pattern.

#### 4. Discussion

The results showed exponential growth of formal development in the periphery of Latin American cities, promoted by market-oriented policies that attracted middle and high-class populations to the fringe of cities. However, the pattern analysis showed that formal development was not located exclusively in areas with lower environmental risk or high mobility. Even more, the statistics revealed that on average, informal settlements were found in areas with better mobility over the years in Bogota. This study shows that segregation was not a generalized in the urban growth in the periphery of Bogota and Sao Paulo between 2000 and 2018

In general, the pattern of informal settlements was similar in Bogota and Sao Paulo. Poor residents built their houses in the periphery but close to the urban fringe and main highways connected to jobs, education, and health care. Meanwhile, formal development exhibited several spatial characteristics, including industries and commercial activities close to cities and highways, suburban recreational condominiums far from the city, suburban houses attracted by the view located in steep slopes, and middle-class in gated communities close to highways for a short commute to downtowns by car. Unlike informal settlements, formal development was situated on the periphery by preferences.

At the scale of the study, there is no generalized form of segregation in all expansion areas. However, it pinpoints locations that privilege formal

developments over informal settlements. The systematic segregation of informal settlements might not be generalized in all periphery, but it impacted more poor residents than other population. As Allen *et al.* (2017) suggested, the environmental risk is intensified by the construction conditions of informal housing.

Specific cases found in this study as outliers proved that segregation in the periphery of Latin American cities has had a similar pattern to the gentrification of city centers. First, the undeveloped land in the expansion of cities had an economic interest for investors, as Borsdorf and Hidalgo (2008) suggested. Second, the government opened regulations such as the Urban Strategic Plans and Zonal Plans, allowing enough freedom for private companies to develop in the expansion of cities. Third, the interest of private developers was to get a higher profit without considering the social difficulties of informal settlements caused by the new developments. Fourth, locations in the periphery were targeted as the most profitable, such as the north side of Bogota, and the such as Barueri, Jandira, and Itapevi sectors in Sao paulo. Fifth, the renewal of target areas responded to the trend that commodifies land according to the preference of high-income people. Finally, public services rates such as sewage and electricity are calculated by socio-economic strata of new developments, making it impossible for low-income residents to afford. The social inequalities mentioned by Jenks and Burgess (2003) and Klaufus (2013) were seen in this study as triggers of systematic spatial segregation in which profitable areas were targeted as commodities increasing the price lasnd and making imposible to poor population living in those areas.

In a city scale, the methodology used in this study was practical to locate target areas to have a more detail analysis. Landsat images proved to be functional in long-term observation of the city's urban growth. Enhanced images through pan-sharpening improved spatial resolution that made more accurate the study. This Geospatial analysis mythology can be replicated in other cities adding more different elements to evaluate. The mapping of informal settlements in specific areas may be improved with images of higher resolution in a smaller scale.

The research workflow showed how urban development affects or segregates particular population locations at a metropolitan scale. Further, it indicated that the causes of segregation are complex, with a variety of physical, political, economic, and social factors. The study focused on environmental risk and mobility of informal settlements. However, the same method could be applied to incorporate other factors, such as access to schools, hospitals, and source of jobs, to fully understand how segregation works. The variables also might be adjusted to use high-resolution images and integrate quality of constructions to identify susceptibility of informal settlements in steep slopes.

In Latin America, each country created specific market-oriented policies that reinforced capitalist urban development, such as partial plans in Colombia and Mexico. However, since the study only focused on two Latin American megacities, future studies may establish a stronger relationship between urban policies and segregating urban patterns in Latin America.

## 5. Conclusion

This study aimed to understand the patterns of development in the periphery of Latin American cities and whether informal settlements were forced to migrate to isolated areas or areas exposed to environmental hazards.

The study showed that segregation not was generalized pattern in the periphery of the Latin American cities. The displacement by social classes in in Bogota and Sao Paulo is complex, and systematic. At the study scale, informal settlements migrated to locations with better environmental conditions, and mobility.

The research was able to identify locations where poor residents were displaced. The methodology proved to be effective to locate sectors where segregation can be identified. Those areas will be study in the future in a focused manner on a smaller scale and with higher resolution images.

## References

- Amparo-Alves, J. (2013). From Necropolis to Blackpolis: Necropolitical governance and black spatial praxis in São Paulo, Brazil. *Antipode*, 46(2), 323–339.  
DOI: /10.1111/anti.12055
- Angotti, T. (2013). Urban Latin America. *Latin American Perspectives*, 40(2), 5-20.  
<http://dx.doi.org/10.1177/0094582x12466832>
- Aguilar, A. G., Ward, P. M., & Sr, C. S. (2003). Globalization, regional development, and megacity expansion in Latin America: Analyzing Mexico City's peri-urban hinterland. *Cities*, 20(1), 3–21.  
[http://dx.doi.org/10.1016/s0264-2751\(02\)00092-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0264-2751(02)00092-6)
- Allen, A., Belkow, T., Escalante Estrada, C., de los Ríos, S., Kamiya, M., Miranda, L., Wesely, J. & Zilbert Soto, L. (2017). De la mitigación de desastres a la interrupción de trampas de riesgo: La experiencia de aprendizaje-acción de clima sin riesgo. *REDER*, 1(1), pp.6-28. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL (2018). La pobreza aumentó en 2016 en América Latina y alcanzó al 30,7% de su población, porcentaje que se mantendría estable en 2017. <https://www.cepal.org/es/comunicados/la-pobreza-aumento-2016-america-latina-alcanzo-al-307-su-poblacion-porcentaje-que-se>.
- Bassett, T. E., & Marpillero-Colomina, A. (2013). Sustaining mobility: Bus rapid transit and the role of local politics in Bogotá. *Latin American Perspectives*, 40(2), 135–145.  
<http://dx.doi.org/10.1177/0094582X12468867>
- Borsdorf, A., & Hidalgo, R. (2008). New dimensions of social exclusion in Latin America: From gated communities to gated cities, the case of Santiago de Chile. *Land Use Policy*, 25(2), 153–160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2007.04.001>
- Budds, J., & Teixeira, P. (2005). Ensuring the right to the city: Pro-poor housing, urban development and tenure legalization in São Paulo, Brazil. *Environment and Urbanization*, 17(1), 89–114. <http://dx.doi.org/10.1177/095624780501700105>
- Castro-Correa, C., Ibarra, I., Lukas, M., Ortiz, J., & Sarmiento, J. P. (2015). Disaster risk construction in the progressive consolidation of informal settlements: Iquique and Puerto Montt (Chile) case studies. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 13(1), 109–127. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.05.001>

- Codina, P. R. (2005). *Formalizing the informal city: designing for development in a Peruvian shantytown* (thesis). University of Maryland.  
<https://drum.lib.umd.edu/handle/1903/2702>
- Gilbert, A. (1998). *The Latin American city*. Monthly Review Press. United Kingdom.
- Guzman, L. A., Oviedo, D., & Rivera, C. (2017). Assessing equity in transport accessibility to work and study: The Bogotá region. *Journal of Transport Geography*, 58, 236-246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.12.016>
- Hardoy, J., & Pandiella, G. (2009). Urban poverty and vulnerability to climate change in Latin America. *Environment and Urbanization*, 21(1), 203-224.  
<http://dx.doi.org/10.1177/0956247809103019>
- Hyman, J. (2018). *Cartographies of power: Unequal urban development and the racialization of space in São Paulo* (thesis). University of San Francisco.
- Inostroza, L., Baur, R., & Csaplovics, E. (2010). Urban sprawl and fragmentation in Latin America: A comparison with European cities. The myth of the diffuse Latin American city. *Journal of environmental management*, 115, 87-97.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.007>
- Inostroza, L. (2016). Measuring urban informality in Latin America. GIS spatial assessment of informal urban development in Santiago De Chile. *Procedia Engineering*, 161(1), 1631-1638. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.638>
- Inostroza, L., & Tábbita, J. H. (2016). Informal urban development in the Greater Buenos Aires Area: A quantitative-spatial assessment based on households' physical features using GIS and principal component analysis. *Procedia Engineering*, 161, 2138-2146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.806>
- Jaitman, L. (2015). Urban infrastructure in Latin America and the Caribbean: Public policy priorities. *Latin American Economic Review*, 24(1), 13.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s40503-015-0027-5>
- Jenks, M., & Burgess, R. (2003). *Compact cities: Sustainable urban forms for developing countries*. Spon Press. New York, NY. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?Direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=77274>
- Klaufus, C. (2013). The Right to a city: Changing peri-urban landscapes in Latin America. In book: *Rethinking urban inclusion: Spaces, mobilizations, interventions*. CES Centre for Social Studies, University of Coimbra. 487-503.  
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1789.3847>
- Kohli, D., Sliuzas, R., Kerle, N., & Stein, A. (2012). An ontology of slums for image-based classification. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(2), 154-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2011.11.001>
- Koch, J. (2013). *Transportation in the favelas of Rio de Janeiro*. Lincoln Institute of Land Policy. Cambridge, MA.  
[https://www.lincolninst.edu/sites/default/files/pubfiles/koch\\_wp13jk1.pdf](https://www.lincolninst.edu/sites/default/files/pubfiles/koch_wp13jk1.pdf)
- Lopez-Morales, E., Shin, H. B., & Lees, L. (2016). Latin American gentrifications. *Urban Geography*, 37(8), 1091-1108.  
<http://dx.doi.org/10.1080/02723638.2016.1200335>
- Maceratini, E. (2011, July). Informal city: The cases of Bogotá and Rio de Janeiro. The International RC21 conference. Amsterdam Institute for Social Science Research – Urban Studies, University of Amsterdam – The Netherlands.  
<http://www.rc21.org/conferences/amsterdam2011/edocs/Session%2029/RT29-1-Maceratini.pdf>

- Mahabir, R., Croitoru, A., Crooks, A. T., Agouris, P., & Stefanidis, A. (2018). A Critical review of high and very high-resolution remote sensing approaches for detecting and mapping slums: Trends, challenges and emerging opportunities. *Urban Science*, 2(1), 8. <http://dx.doi.org/10.3390/urbansci2010008>
- Montaña, M. C., & Borrero, O. A. (2015). *Los planes parciales en Colombia: Evaluación de la aplicación de planes parciales y reajuste del suelo en siete ciudades Colombianas, 2006-2013*. Instituto de Estudios del Ministerio Público. Cámara de Comercio de Bogotá. Bogotá. <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/13166>
- Moreno, C., & Miralles-Guasch, C. (2017). The bicycle as a real feeder to the transmillenio system in Bogota and Soacha. *International Journal of Transport Development and Integration*, 1(1), 92-102. <http://dx.doi.org/10.2495/TDI-V1-N1-92-102>
- Rojas, C., Muñiz, I., & Pino, J. (2013). Understanding the urban sprawl in the mid-size Latin American Cities through the urban form: Analysis of the Concepcion Metropolitan Area (Chile). *Journal of Geographic Information System*, 5(3), 222–234. <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2013.53021>
- Silva, H. M. B., & Ceneviva, L. V. 1996. Favelas y fraccionamientos irregulares en São Paulo. In *El acceso de los pobres al suelo urbano*. Centro de estudios mexicanos y centroamericanos, 169-218. <http://dx.doi.org/10.4000/books.cemca.929>
- Tomasiello, D. B., Giannotti, M., Arbex, R., & Davis, C. (2019). Multi-temporal transport network models for accessibility studies. *Transactions in GIS*, 23(2), 203–223. <http://dx.doi.org/10.1111/tgis.12513>
- Wenzel, F., Bendimerad, F., & Sinha, R. (2007). Megacities–megarisks. *Natural Hazards*, 42(3), 481–491. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-006-9073-2>
- Yañez-Pagans, P., Martínez, D., Mitnik, O. A., Scholl, L., & Vazquez, A. (2019). Urban transport systems in Latin America and the Caribbean: Lessons and challenges. *Latin American Economic Review*, 28(1), 15. <http://dx.doi.org/10.1186/s40503-019-0079-z>



# **Análisis espaciotemporal del proceso de pérdida forestal en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Michoacán, México**

Spatio-temporal analysis of the process of forest loss in the municipalities of Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro and Zinapécuaro. Michoacan, Mexico

Araceli Benítez Franco<sup>1</sup>

*Recibido 3 de octubre de 2022; aceptado 17 de noviembre de 2022*

## **RESUMEN**

En el estado de Michoacán, México, se ha incrementado la pérdida de superficie forestal por el cambio de uso de suelo y la expansión de cultivos permanentes, en particular el cultivo de aguacate. Los modelos espacio-temporales permiten conocer cuáles son las interacciones que influyen en la ocurrencia de este fenómeno de cambio de uso de suelo y visualizar los patrones espaciales resultantes. En la presente investigación se identificaron los cambios de uso de suelo de 1994 a 2015 en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro del estado de Michoacán. Con esta información se construyó el modelo DEFORELATIONS, con el que se analizaron diversas relaciones espaciales presentes en el área de estudio, se identificaron los factores que han influido en la pérdida de dos categorías de cubierta forestal, bosque y bosque abierto; por último, se hizo una predicción de las áreas susceptibles a la pérdida forestal y su grado de probabilidad a la pérdida forestal. De la aplicación del modelo, de diez relaciones espaciales analizadas sólo la proximidad de la cubierta forestal a los asentamientos humanos, proximidad a los caminos, y proximidad a los cultivos permanentes y anuales resultaron estadísticamente relevantes para la pérdida de bosque. Para el caso de la pérdida de bosque

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, México. Correo electrónico: [geografa.araceli@gmail.com](mailto:geografa.araceli@gmail.com).  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4043-7202>.

abierto resultaron relevantes estas mismas relaciones, con excepción de la proximidad a los caminos.

Palabras clave: *Pérdida de cubierta de forestal, relaciones espaciales, DEFORELATIONS.*

## ABSTRACT

In the state of Michoacan, Mexico, the forest loss has increased due to the change in land use caused by the expansion of permanent crops, particularly avocado cultivation. The spatio-temporal models allow us to know what are the interactions influencing the occurrence of this phenomenon of land use change and help to visualize the resulting spatial patterns. In this research, changes in land use were identified from 1994 to 2015 in the municipalities of Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro and Zinapécuaro in the state of Michoacán. Within the above context, a DEFORELATIONS model was built, where the spatial relationships present in the study area were analyzed, and those factors that have influenced the loss of forest and open forest were identified. Finally, a prediction was done of the areas susceptible to forest loss and their degree of probability of forest loss. From the application of the model, from the 10 spatial relationships analyzed, only proximity of forest cover to human settlements, proximity to roads, and proximity to permanent and annual crops, were relevant to forest loss. In the case of the loss of open forest, the same relationships were relevant, with exception of proximity of forest to roads.

Key words: *forest cover loss, spatial relations, DEFORELATIONS.*

## 1. Introducción

A nivel mundial de 1990 a 2015 la tasa de pérdida neta de bosques ha disminuido en más de un 50 por ciento, se tiene el registro de una pérdida neta de unos 129 millones de hectáreas de bosque (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2016). Los ecosistemas forestales cada vez se ven más perjudicados por cambios como la conversión de la cobertura del terreno, degradación, tala inmoderada e ilegal del arbolado para el mercado de madera y sobrepastoreo. Estos procesos, de deforestación o degradación forestal, se asocian a impactos ecológicos importantes en prácticamente todas las escalas (Lambin, 1997, como se citó en Rosete *et al.*, 2008).

El estado de Michoacán posee una superficie forestal importante, ya que en el 2011 representaba el 2% (3,405,824 hectáreas) de la superficie de bosque en México, donde en el país en el año 2011 se registraron 140,581,638 hectáreas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2013). No obstante, este recurso se ha visto afectado por diferentes procesos de deforestación y en los últimos años, por el desarrollo acelerado del cultivo del aguacate. Para el 2011 se estimó una cifra de 153,018 hectáreas de superficie cultivada de aguacate en el estado, de las cuales al menos 50,000 hectáreas pueden atribuirse a la introducción del cultivo en zonas forestales (Morales *et al.*, 2012). Otro estudio donde se obtuvieron tasas de cambio que describen la pérdida de cubierta forestal a nivel regional en el estado de Michoacán fue Mas *et al.*, (2016) el cual realizó un

monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación usando un modelo híbrido (interpretación digital y visual) por medio de un análisis de imágenes satelitales. Sin embargo, no se han realizado estudios en un área de interés de menor escala en Michoacán que puedan precisar los factores que podrían contribuir en la pérdida forestal.

Con el estudio sobre el cambio global forestal de la Universidad de Maryland en los Estados Unidos (Hansen *et al.*, 2013), fue posible observar que del año 2000 a 2012 hubo una pérdida forestal importante en la parte noreste de Michoacán sobre todo en los municipios de Charo, Indaparapeo, Queréndaro, Zinapécuaro, e Hidalgo, además que las últimas actualizaciones a 2021 se sigue presentando pérdida de bosque en esta zona. Para estos municipios sería muy útil desarrollar un modelo que explore esta dinámica de cambio y con ello facilitar la predicción de las áreas forestales que se encuentran en peligro de ser deforestadas.

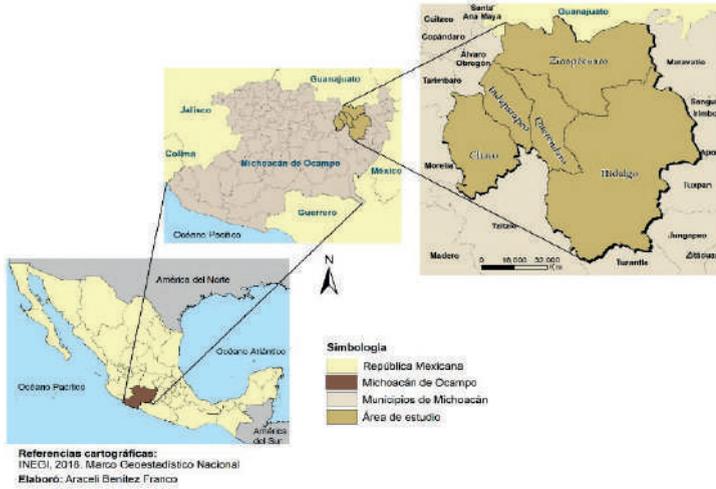
En el año 2013, Morales construyó un modelo general para estudiar los factores que son relevantes en el proceso de deforestación, con el nombre de DEFRELATIONS, el cual permite identificar áreas con tendencia a este proceso. Este modelo se basa principalmente en identificar las relaciones espaciales relevantes en el proceso de deforestación en un determinado lugar, y para su validación se utilizan pruebas estadísticas. Vizcaino (2013) utilizó este modelo para dos zonas, evaluó las relaciones espaciales implicadas en la pérdida de bosque. Obteniendo que las relaciones relevantes para la reserva de biósfera de los Tuxtlas en Veracruz, México, fueron la pendiente del terreno y la proximidad a zonas agropecuarias, mientras que, en la otra zona, que fue un corredor ecológico en Brasil, resultaron relevantes la proximidad a las vías de comunicación y a las zonas agropecuarias. Otro estudio adaptó el mismo modelo fue Reyes (2014) en dos zonas de distinto clima y cubierta forestal (bosque templado y selva baja), y las relaciones espaciales relevantes para la zona templada fue solamente la altitud y para la zona tropical solo la proximidad a los caminos.

Para esta investigación se planteó realizar un análisis de las zonas forestales en los municipios de Charo, Indaparapeo, Queréndaro, Zinapécuaro, e Hidalgo, para determinar los cambios que han sucedido en dichas superficies de 1994 a 2015, con el propósito de identificar los factores espaciales que han influido en el cambio de la cubierta forestal a otro tipo de uso de suelo. Por último, con esta información se construye un modelo para definir factores, y con ello predecir áreas susceptibles a la pérdida forestal.

## 2. Métodos

### 2.1 Área de estudio

Los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro, área de estudio, están ubicados en la parte noreste del estado de Michoacán, México (Figura 1), tienen en conjunto una superficie de 2,457 km<sup>2</sup>, la cual ocupa el 4.21 % de la superficie del estado de Michoacán (INEGI, 2013).



**Figura 1.** Área de estudio.

El área de estudio tiene 11 tipos de suelos, donde los que predominan son el Andosol, el Vertisol y Luvisol, y en poca concentración se tiene el Planosol, Durisol y Solonchak (INEGI, 2007a). Se tiene siete unidades climáticas, en general el clima es templado subhúmedo (INEGI, 2007b), en este tipo de clima las temperaturas van entre 10° y 18 °C y de 18° a 22 °C. Sin embargo, en algunas regiones puede disminuir a menos de 10 °C; registra precipitaciones de 600 a 1,000 mm en promedio durante el año (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2010). La vegetación del área de estudio es bosque de encino, pino, oyamel, pino-encino, encino-pino; también cuenta con una gran variedad de vegetación secundaria arbustiva, vegetación secundaria arbórea, pastizales y con pequeñas áreas de tulares (INEGI, 2013).

## 2.2 Procedimiento metodológico

La metodología consta de tres etapas generales, la primera es la determinación de la ubicación y características de las zonas forestales que han experimentado deforestación, mediante un estudio de cambio de la cubierta forestal con fotografías aéreas e imágenes satelitales desde 1994 a 2015; la segunda es la construcción del modelo DEFORELATIONS (Morales, 2013) para la exploración de las relaciones espaciales que intervienen en el proceso de deforestación y por último la aplicación del modelo para la determinación de la probabilidad de pérdida forestal a futuro.

## 2.3 Determinación del cambio de uso y cobertura del suelo en zonas forestales y caminos

Para clasificar el uso de suelo y cubierta de suelo y caminos de 1994 y 2015 en este caso particular se consideran las siguientes clases: cultivos anuales, cultivos

permanentes, matorrales-pastizales, cuerpos de agua, asentamientos humanos, bosque y bosque abierto. Este último se distingue por la distribución discontinua de los árboles (FAO, 1998). Estas clases se digitalizan con interpretación visual con ortofotos aéreas de INEGI de 1994 e imágenes SPOT 5 del 2014 a una escala de 1:20,000, esto se realiza en un sistema de información geográfica. Cuando algunas zonas estaban cubiertas de nubes se utilizó las de SPOT 6 del 2014. La capa 2014 obtenida se actualiza con imágenes de Landsat 7 del año 2015, teniendo como referencia la visualización en Google Earth.

Para determinar el cambio entre las dos fechas, se ponen valores a cada tipo de usos y cubiertas de suelo obtenidas en formato vectorial para ambas fechas. Se realiza una intersección de las dos temporalidades y se suman los valores de cada fecha, si el resultado es un valor diferente a lo que se esperaba es que hubo un cambio y si el valor es el esperado es que no hubo cambio. Con este resultado se obtiene las zonas de cambio en las cubiertas y usos de suelo dentro del área de estudio, principalmente en las cubiertas forestales, que son el enfoque en esta investigación. Para obtener los caminos, de igual manera se realizó una interpretación visual con las ortofotos e imágenes SPOT y Landsat ya mencionadas, para obtener las capas correspondientes a 1994 y 2015.

## **2.4 Construcción del modelo DEFORELATIONS**

El modelo DEFORELATIONS es un modelo exploratorio y predictivo que estima la probabilidad de deforestación considerando como parámetros las relaciones espaciales locales identificadas como relevantes a partir de los patrones de cambio en la cubierta forestal (Morales, 2013). El modelo se construye dependiendo del contexto de la zona de estudio, puesto que cada lugar tiene sus características geográficas particulares, y por lo tanto la estimación de la probabilidad de deforestación dependerá de los patrones que se estén presentando en dicho lugar. Por lo tanto, no existe un solo modelo aplicable a todos los lugares ni a cualquier período de tiempo. Para esta investigación se estructura el modelo DEFORELATIONS y para su desarrollo se siguieron las fases de relevancia (identificación de los parámetros), influencia (funciones de probabilidad) y ponderación (especificación de los pesos de cada parámetro). En este estudio en particular se considera la deforestación en bosque y bosque abierto, por lo cual la metodología del modelo DEFORELATIONS se aplica para ambos casos.

### **2.4.1 Determinación de la relevancia**

Para determinar las relaciones espaciales relevantes para el modelo DEFORELATIONS, es necesario la obtención de los siguientes insumos cartográficos: la pérdida de bosque y bosque abierto (resta de cubierta de 1994 menos la del año 2015); pérdida de bosque y bosque abierto aleatoria, estas capas se obtuvieron con una simulación de la posición aleatoria (con distribución uniforme) a partir de cada capa raster de pérdida real de bosque y bosque abierto convirtiendo en punto cada celda y distribuyendo aleatoriamente en las capas de bosque y bosque abierto de 1994; con la capa de mínima distancia-

costo sobre el terreno en este caso se tomaron los ríos de la red hidrográfica, (INEGI, 2010) y la capa de caminos de 1994. Se asigna el valor No Data a lo que funcione como barrera en este caso a los ríos, con valor 0 donde no represente una barrera como lo es la superficie del área de estudio y a la intersección de caminos con ríos. Otras capas necesarias fueron las de uso y cubiertas de suelo de 1994; orientación de las pendientes obtenidas a partir del Modelo Digital de Elevación del satélite ASTER, 2018; la altitud; los diferentes tipos de suelo del área de estudio de INEGI (2007a) y por último la capa de la tenencia de la tierra del Registro Agrario Nacional (2018). Todos estos insumos se convierten a un formato raster con un tamaño de celda de 30 metros. Además, para los cinco municipios del área de estudio se generó un buffer de dos kilómetros, con la finalidad de que al momento de realizar los análisis para el modelo tener un margen de confiabilidad y evitar el error del efecto límite en el análisis espacial.

Cuando se considera el tiempo para un análisis de cambio, es esencial incorporar técnicas que enfatizan no solo los efectos que producen un cambio, sino también el análisis de los patrones que se presentan en donde este cambio sucede. Por ello es necesario determinar, *a priori*, cuáles son las relaciones espaciales que hipotéticamente influyen en el proceso de pérdida forestal. Las clases de relaciones espaciales que podemos encontrar en el espacio-tiempo son proximidad, orientación, exposición, adyacencia, contención, coincidencia, conectividad, agregación y asociación (Morales, 2014).

Para esta investigación se utilizaron relaciones espaciales de proximidad (sirven para analizar el efecto de la separación entre eventos espaciales), calculando la distancia existente entre las zonas de pérdida forestal y otros elementos en el territorio: los asentamientos humanos, los caminos, los cultivos anuales y los permanentes, las zonas de matorral-pastizal y las de bosque abierto, de manera individual este último solamente para el caso de pérdida de bosque estrictamente hablando. También, se emplean relaciones espaciales de coincidencia (posible interacción entre eventos que comparten el mismo espacio al mismo tiempo), donde se analizaron mediante la sobreposición de las zonas de pérdida de bosque y bosque abierto con los elementos espaciales de altitud, pendiente y orientación del terreno, suelos y tenencia de la tierra, de manera individual.

Otro proceso que se requirió realizar fue el cálculo de la capa de costo de accesibilidad para cada uno de los elementos considerados (asentamientos humanos, caminos, cultivos anuales y permanentes, matorral-pastizal y bosque abierto) de la fecha anterior, en este caso 1994, para así obtener las capas de costo-distancia mínimos de cada uno de estos elementos. El segundo procedimiento es hacer una multiplicación de cada una de las capas resultantes del proceso anterior con la capa de la pérdida forestal real y con la de pérdida forestal aleatoria (estas últimas dos capas son capas raster con valores de celda de 1 para las zonas en donde hay pérdida forestal real o hipotética), para obtener los valores de distancia-costo mínimos de las áreas de pérdida forestal, tanto real como aleatoria. Las capas resultantes se reclasifican en intervalos de clases con los mismos rangos de cada relación espacial, tanto en la capa

aleatoria como real, ya que esto servirá para comparar las distribuciones de cada evento en histogramas de frecuencia.

En el caso de las relaciones de coincidencia, los resultados se obtienen con la multiplicación directa de las capas de pérdida forestal real y aleatoria con cada uno de los elementos en relación de coincidencia (altitud, pendiente y orientación del terreno, suelos y tenencia de la tierra).

Con los resultados de los procedimientos anteriores, se prosigue a la elección de las relaciones espaciales relevantes. La evaluación de su relevancia se hace mediante pruebas estadísticas, con la finalidad de identificar cuáles se incluirán en el modelo como parámetros, es decir que tan significativa parece ser su contribución al proceso de deforestación. Para las relaciones espaciales de las capas de pérdida forestal real y aleatoria con los diferentes elementos espaciales se generan histogramas de frecuencia. Si los histogramas de frecuencia de ambas distribuciones son muy similares, hipotéticamente la distribución de pérdida forestal dada por la relación espacial analizada probablemente no sea relevante; si por el contrario ambas distribuciones difieren notoriamente, entonces la posibilidad de que la relación en cuestión sea relevante será muy fuerte, puesto que no se parece a un proceso aleatorio de pérdida forestal.

El segundo paso es realizar pruebas de normalidad de las distribuciones de frecuencia real y aleatoria de las relaciones espaciales modeladas anteriormente, si el resultado en ambas distribuciones es normal se comparan mediante la prueba T de Student y la prueba F de Fisher. En el caso de que las pruebas de normalidad sean negativas para una o ambas distribuciones, se emplean las pruebas no paramétricas U de Mann – Whitney (Wilcoxon) y la prueba Dn de Kolmogorov–Smirnov. Con estas pruebas se evalúa la similitud de los valores de la distribución real y aleatoria de cada relación, esto para comprobar su relevancia para el modelo. Si en los resultados obtenidos se encuentran diferencias significativas en las dos pruebas, es decir se rechaza la hipótesis nula (el nivel de confianza usualmente es de 95%, aunque esto puede relajarse en el modelo), la relación se toma como un parámetro para nuestro modelo DEFORELATIONS.

Cuando la diferencia significativa solo se da en una de dos pruebas estadísticas, se puede optar por elegir o no la relación espacial para considerarla como parámetro. En la práctica esto quiere decir que la contribución de esta relación al proceso de deforestación no es tan clara, o espacialmente si lo es en algunas porciones del territorio bajo estudio, pero en otras no. En este caso particular se tomarán los niveles de relevancia: 95% si  $P \leq 0.05$ , la relación es muy relevante, 85% si  $P \geq 0.05$  pero  $P \leq 0.15$ , la relación es relevante. 75% si  $P \geq 0.15$  pero  $P \leq 0.25$ , la relación es suficientemente relevante. De aquí en adelante, las relaciones espaciales que resultan relevantes se consideran como parámetros del modelo.

#### 2.4.2 Determinación de la influencia de los parámetros

Se consideran solo las relaciones espaciales que resultaron relevantes (parámetros del modelo). El siguiente paso es ajustar para cada parámetro una función matemática que mejor describa la distribución de valores de la relación.

Esta se obtiene mediante un procedimiento de ajuste de una curva por mínimos cuadrados. Como es posible elegir múltiples funciones con ajuste aceptable, se selecciona la de mínimo número de términos y con el mayor R2 ajustado, de manera que la ecuación se ejecute con relativa facilidad en el modelo mediante un SIG.

### 2.4.3 Ponderación de los parámetros relevantes

Una vez estimada la influencia, se asignan pesos (suma total de valor de 1) en las ecuaciones, utilizando los estadísticos  $D_n$  de una prueba de Kolmogorov-Smirnov, las cuales se obtuvieron de comparar las distribuciones real y aleatoria de la pérdida forestal en las pruebas en donde las distribuciones resultaron no normales. Pero si las distribuciones de los parámetros relevantes resultaron normales, entonces es necesario realizar el análisis para obtener dicho valor estadístico de  $D_n$ . La lógica de ponderar mediante este procedimiento se basa en que mientras mayor sea la distancia entre las distribuciones estadísticas acumuladas de las distribuciones de valores de las relaciones espaciales real y aleatoria de pérdida forestal, la contribución de la relación es menos aleatoria y, por lo tanto, mayor contribución o peso debe tener en el modelo de predicción de la pérdida forestal.

### 2.4.4 Aplicación del modelo

Con los pesos de cada parámetro, el paso final es la construcción del modelo de probabilidad de deforestación de bosque y otro para la deforestación de bosque abierto. Para esta construcción se tiene dos modos de obtener resultados, el modo paramétrico y el modo sintético. El primero se ejecuta con las funciones matemáticas ya elegidas, que establecen la probabilidad de deforestación según cada parámetro de forma individual, obteniendo como resultante un mapa de probabilidad de deforestación específico de cada parámetro. La intención de este modo paramétrico es poder explorar la contribución individual de cada parámetro en la probabilidad de pérdida forestal.

Es importante resaltar que en esta etapa el cálculo de cada capa de los parámetros del modelo se hace con capas que muestran las relaciones de proximidad correspondientes a los parámetros con el año 2015, puesto que se trata de predecir la probabilidad de deforestación de áreas de bosque o bosque abierto en ese año o a futuro.

En el modo sintético se realiza una suma, mediante el procedimiento de combinación lineal ponderada, de todos los parámetros relevantes considerando la ponderación de cada parámetro relevante, es decir, el resultante de cada ecuación e integrando a cada uno sus pesos correspondientes (Ecuación 1):

$$PD = W_i P_i + W_{i+1} P_{i+1} \dots W_n P_n \quad (1)$$

PD = Probabilidad de deforestación de la cubierta forestal

$W_i$  = Peso del parámetro  $i$ ,  $i = 1 \dots n$

$P_i$  = Parámetro (es decir la relación espacial relevante para el modelo resultante de la ecuación elegida)

Obteniendo como resultados finales un mapa de probabilidad integral ponderado de pérdida forestal tanto para el bosque como para el bosque abierto.

### 3. Resultados

#### 3.1 Obtención de la cubierta y uso de suelo y caminos

Los primeros resultados obtenidos fueron las cubiertas y uso de suelo y los caminos, los cuales se muestran en la Figura 2 y Figura 3.

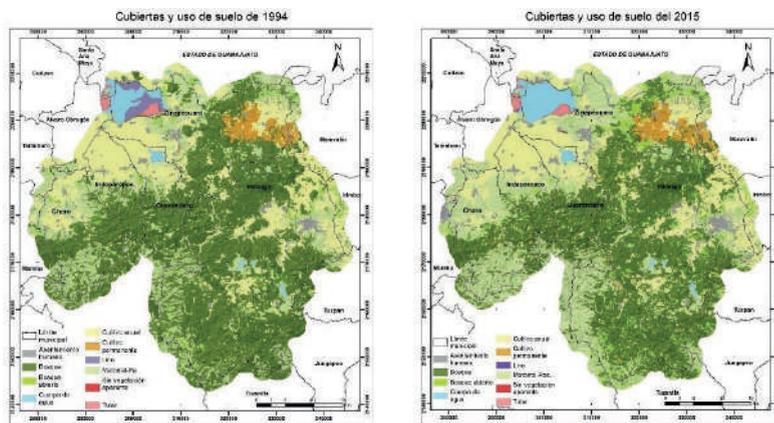


Figura 2. Cubiertas de uso de suelo de 1994 y 2015.

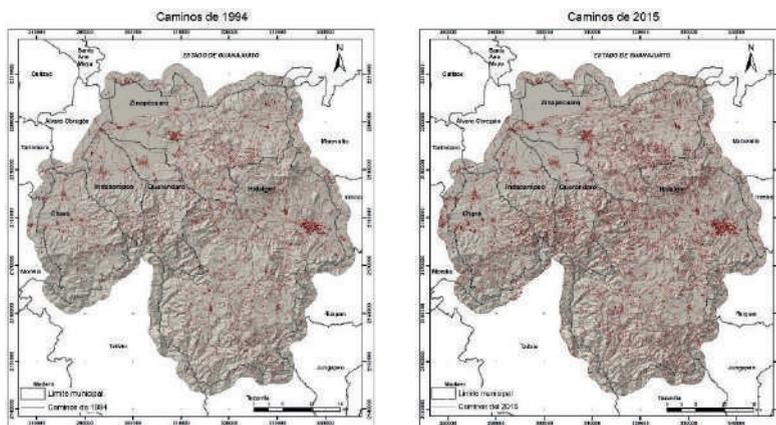


Figura 3. Caminos de 1994 y 2015.

En el área de estudio, los caminos en el año de 1994 tenían una longitud de 7,046.39 km, y para el 2015 fue de 11,520.28 km lineales, lo cual representa un incremento de un 63% (4,473 km). Lo que respecta a los cambios en las cubiertas y uso de suelo en la Tabla 1 se aprecia que

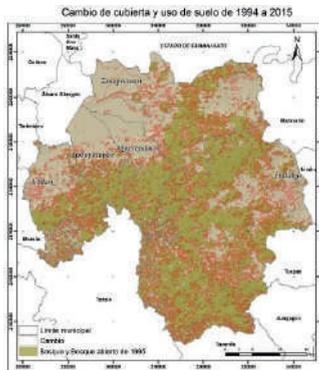
en el año 2015 el bosque disminuye en superficie un 17% de lo que se tenía en 1994, ya que en algunos el cambio fue de bosque a asentamientos humanos, además que esto dio paso al incremento de bosque abierto.

**Tabla 1.** Cambios en las cubiertas y uso de suelo

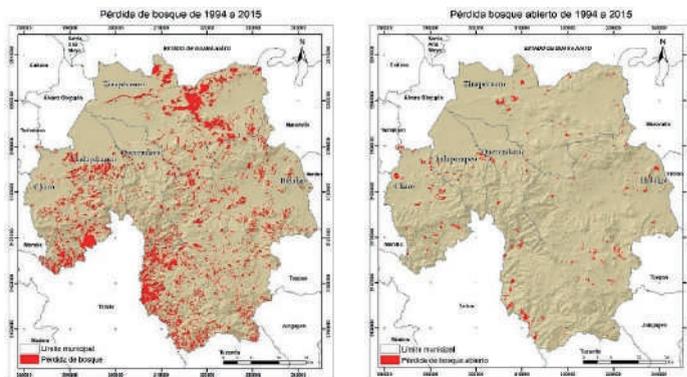
<i>Tipo de uso/cubierta</i>	<i>Superficie de 1994 (ha)</i>	<i>Superficie de 2015 (ha)</i>	<i>Aumento de superficie</i>	<i>Disminución de superficie</i>
Asentamiento humano	6,222.36	8,451.79	2,229.43	0.00
Bosque	128,243.37	106,733.13	0.00	21,510.24
Bosque abierto	4,617.81	11,525.55	6,907.73	0.00
Cuerpo de agua	5,423.49	7880.34	2456.85	0.00
Cultivo anual	46,959.17	41,223.47	0.00	5,735.70
Cultivo permanente	5,659.57	7,317.85	1,658.28	0.00
Lirio	2,550.07	0.00	0.00	0.00
Matorral-pastizal	4,6945.38	63,354.77	16,409.39	0.00
Sin vegetación aparente	55.42	159.48	104.06	0.00
Tular	764.28	794.55	30.26	0.00
Total	247,440.93	247,440.93	2,9796.01	27,245.94

En la Figura 4 se muestra espacialmente los cambios que se presentaron en las cubiertas de uso de suelo en el lapso de 21 años, debajo de esta capa se integró la de bosque y bosque abierto de 1994.

Otros resultados obtenidos del análisis de cambio de uso del suelo fueron la pérdida de bosque y bosque abierto (Figura 5), las cuales se obtuvieron de una simple resta espacial de bosque y bosque abierto del 2015, menos lo que se tenía en el año 1994.



**Figura 4.** Cambio en la cubierta y uso de suelo.



**Figura 5.** Pérdida de cubierta forestal de 1994 a 2015.

### 3.2 Construcción del modelo

A continuación, se explican los resultados obtenidos de cada fase y los insumos cartográficos realizados para la construcción del modelo DEFORELATIONS.

#### 3.2.1 Análisis de la relevancia

Para esta fase se generaron las capas de las relaciones espaciales de proximidad y coincidencia, tanto para pérdida de bosque y bosque abierto, en sus distribuciones real y aleatoria. En la Tabla 2 y Tabla 3 se muestra el resultado y las pruebas estadísticas utilizadas para obtener la relevancia de las relaciones espaciales. Aquellas relaciones espaciales que resultaron relevantes, a partir de este momento se convierten en parámetros del modelo.

**Tabla 2.** Resultado de la determinación de la relevancia de las relaciones espaciales para bosque

<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque con</i>	<i>Pruebas estadísticas realizadas</i>	<i>Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medias) P</i>	<i>Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ Dn de Kolmogorov Smirnov) P</i>	<i>Relevancia</i>
Asentamiento humano	No paramétrica	0.078339	0.002499	Muy relevante
Cultivo permanente	No paramétrica	0.920459	0.080465	Relevante
Cultivo anual	No paramétrica	0.077822	0.004958	Muy relevante
Camino	No paramétrica	0.003373	0.000094	Muy relevante
Matorral – pastizal	No paramétrica	0.693585	0.993356	No
Bosque abierto	No paramétrica	0.728258	0.952478	No

<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque con</i>	<i>Pruebas estadísticas realizadas</i>	<i>Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medias) P</i>	<i>Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ Dn de Kolmogorov Smirnov) P</i>	<i>Relevancia</i>
Altitud	No paramétrica	0.934359	0.722234	No
Orientación de la pendiente	Paramétrica	0.39817	0.109554	Relevante*
Suelos	No paramétrica	0.645761	0.993356	No
Tenencia de la tierra	No paramétrica	0.930227	0.99723	No
Pendiente	No paramétrica	0.821076	0.728805	No

\*Este caso es muy particular y se explica más adelante por qué no se toma finalmente como relevancia dicha relación espacial.

**Tabla 3.** Resultado de la determinación de la relevancia de las relaciones espaciales para bosque abierto

<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque abierto a</i>	<i>Pruebas estadísticas realizadas</i>	<i>Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medias) P</i>	<i>Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ Dn de Kolmogorov Smirnov) P</i>	<i>Relevancia</i>
Asentamiento humano	No paramétrica	0.028208	0.087401	Muy relevante
Cultivo permanente	No paramétrica	0.047941	0.103137	Muy Relevante
Cultivo anual	No paramétrica	0.038337	0.036631	Muy relevante
Camino	No paramétrica	0.470484	0.532016	No
Matorral - pastizal	No paramétrica	1	1	No
Bosque	No paramétrica	0.798294	1	No

<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque con</i>	<i>Pruebas estadísticas realizadas</i>	<i>Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medias) P</i>	<i>Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ Dn de Kolmogorov Smirnov) P</i>	<i>Relevancia</i>
Altitud	No paramétrica	0.934359	0.722234	No
Orientación de la pendiente	Paramétrica	0.39817	0.109554	Muy relevante*
Suelos	No paramétrica	0.645761	0.993356	No
Tenencia de la tierra	No paramétrica	0.930227	0.99723	No
Pendiente	No paramétrica	0.821076	0.728805	No

\*Este caso es muy particular y se explica más adelante por qué no se toma finalmente como relevancia dicha relación espacial.

### 3.2.2 Análisis de la influencia de los valores de los parámetros

El cálculo de probabilidad de pérdida de bosque y de bosque abierto se determina por medio de funciones matemáticas, ajustadas para cada parámetro relevante del modelo DEFORELATIONS. Para ello se realizó un ajuste de mínimos cuadrados, y se eligió aquella ecuación que describiera de mejor manera la distribución de los datos para la pérdida de bosque y bosque abierto. Es importante señalar que la relación espacial de coincidencia de la orientación de pendiente con bosque y bosque abierto no se consideró en la determinación de la influencia debido a que en una de las etapas del modelo se necesita el valor de Dn que se obtiene de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, y este resulta muy dispar en comparación con las otras relaciones. Posiblemente esto se debe a que, a diferencia de las otras relaciones, la orientación de las laderas tiene valores con una distribución circular en lugar de lineal (los valores de 0 y 360 grados representan la misma orientación, debido a que el concepto de ángulo azimutal es circular) y esto requiere de otra clase de pruebas estadísticas. La Tabla 4 contiene las relaciones espaciales para bosque y bosque abierto que se consideraron como parámetros relevantes, con su respectiva ecuación. Es importante señalar que cada ecuación obtenida fue no solamente la ecuación si no también los valores de las constantes a, b y c. En el caso de la variable x se utiliza la capa raster de proximidad del bosque 2015 a cada parámetro 2015.

**Tabla 4.** Relaciones espaciales con su función de probabilidad para el caso de pérdida de bosque y bosque abierto

<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque a</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Función de probabilidad (Ecuación)</i>
Asentamiento humano	Relevante	$y^{(-1)} = a + bx^2 + \frac{c}{\ln x}$
Cultivo permanente	Relevante	$\ln y = a + bx^{1.5} + cx^{0.5}$
Cultivo anual	Muy relevante	$Y^{-1} = a + bx^2$
Caminos	Muy relevante	$\ln y = a + b^2$
<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque abierto a</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Función de probabilidad (Ecuación)</i>
Asentamiento humano	Muy relevante	$\ln y = a + b(\ln x)^2 + c \ln x / x$
Cultivo permanente	Relevante	$y = a + b \ln x + cx^3 + dx(0.5) \ln x$
Cultivo anual	Muy relevante	$y^{(-1)} = a + bx^2$

### 3.2.3 Análisis de la ponderación

Para determinar la contribución de cada relación en la pérdida forestal, se utilizan los valores de Dn obtenidos con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, y con estos valores se calcula el peso de cada parámetro del modelo. Es importante explicar que la orientación de la pendiente no se tomó como parámetro para pérdida de bosque y bosque abierto, puesto que al calcular dicha prueba de

Kolmogorov-Smirnov el valor -P (Dn) salió mayor de 0.25, esto confirma que esta relación espacial requiere de otras pruebas que consideren datos circulares. Si se incluyera en la ponderación haría que la diferencia entre los pesos de los otros parámetros y éste fuera muy grande. En la Tabla 5 y Tabla 6 se muestran dichas ponderaciones.

**Tabla 5.** Parámetros con su respectivo peso con la pérdida de bosque

<i>Municipios de estudio</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Dn</i>	<i>Peso</i>
Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro	Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque	0.229508	0.15
	Proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque	0.333333	0.22
	Proximidad de asentamientos Humanos a pérdida de bosque	0.351852	0.23
	Proximidad de caminos a pérdida de bosque	0.586207	0.39
Suma		1.5009	1

**Tabla 6.** Parámetros con su respectivo peso con la pérdida de bosque abierto

<i>Municipios de estudio</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Dn</i>	<i>Peso</i>
Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro	Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque	0.22807	0.29
	Proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque abierto	0.26087	0.34
	Proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque abierto	0.285714	0.37
	Suma	0.774654	1

### 3.2.4 Análisis paramétrico

En esta fase se tomaron las funciones matemáticas anteriormente definidas para ejecutarlas en un SIG y así obtener la probabilidad de pérdida de forestal en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Esto se realizó con cada uno de los parámetros de manera individual para observar claramente cómo influye cada uno de ellos en la probabilidad de pérdida de bosque y bosque abierto. Para facilitar la interpretación de los mapas los valores resultantes se reclasificaron en rangos de probabilidad.

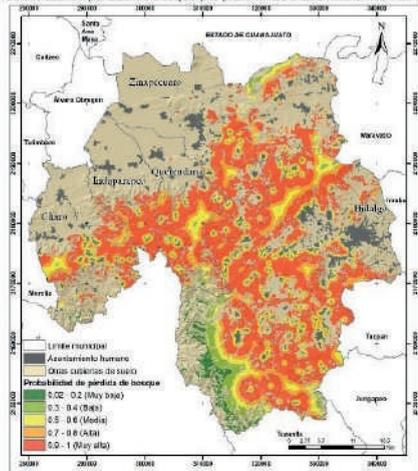
### 3.2.5 Probabilidad de pérdida de bosque por cada parámetro

A continuación, se muestran los resultados de cada parámetro (Figura 6) obtenidos de su respectiva ecuación, para obtener el mapa de probabilidad de pérdida de bosque por cada parámetro.

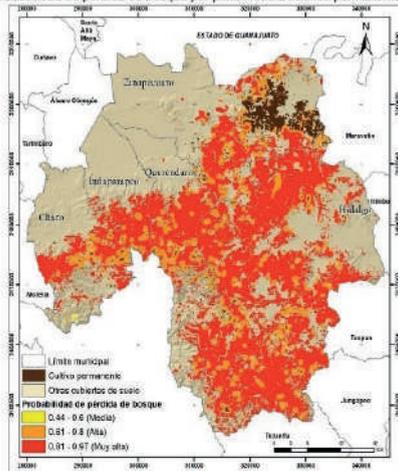
### 3.2.6 Probabilidad de pérdida de bosque abierto por cada parámetro

De igual manera que para la probabilidad de pérdida de bosque, en este caso se lleva a cabo la implementación de cada ecuación para su respectivo parámetro. Enseguida se muestra cada uno de los resultados en la Figura 7.

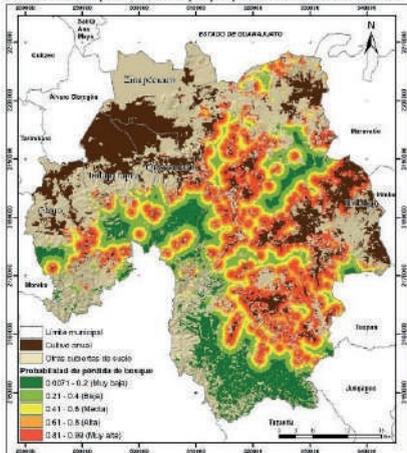
Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a asentamientos humanos



Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a cultivos permanentes



Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a cultivos anuales



Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a caminos

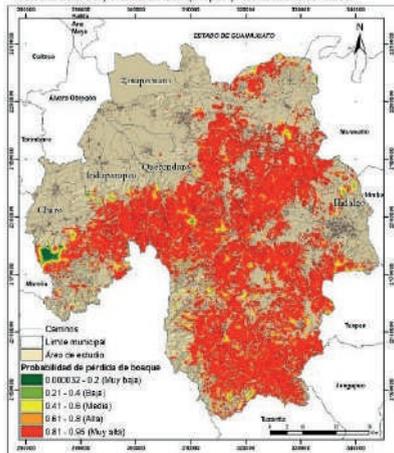


Figura 6. Probabilidad de pérdida de bosque por cada parámetro.

### 3.2.7 Análisis sintético

Para finalizar la aplicación del modelo DEFORELATIONS, se efectuó la suma, mediante combinación lineal ponderada, de todos los parámetros relevantes, pero considerando el peso de cada uno de ellos. De este modo se obtiene la probabilidad integral de pérdida de bosque y bosque abierto en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Los dos resultados obtenidos se muestran en la Figura 8.

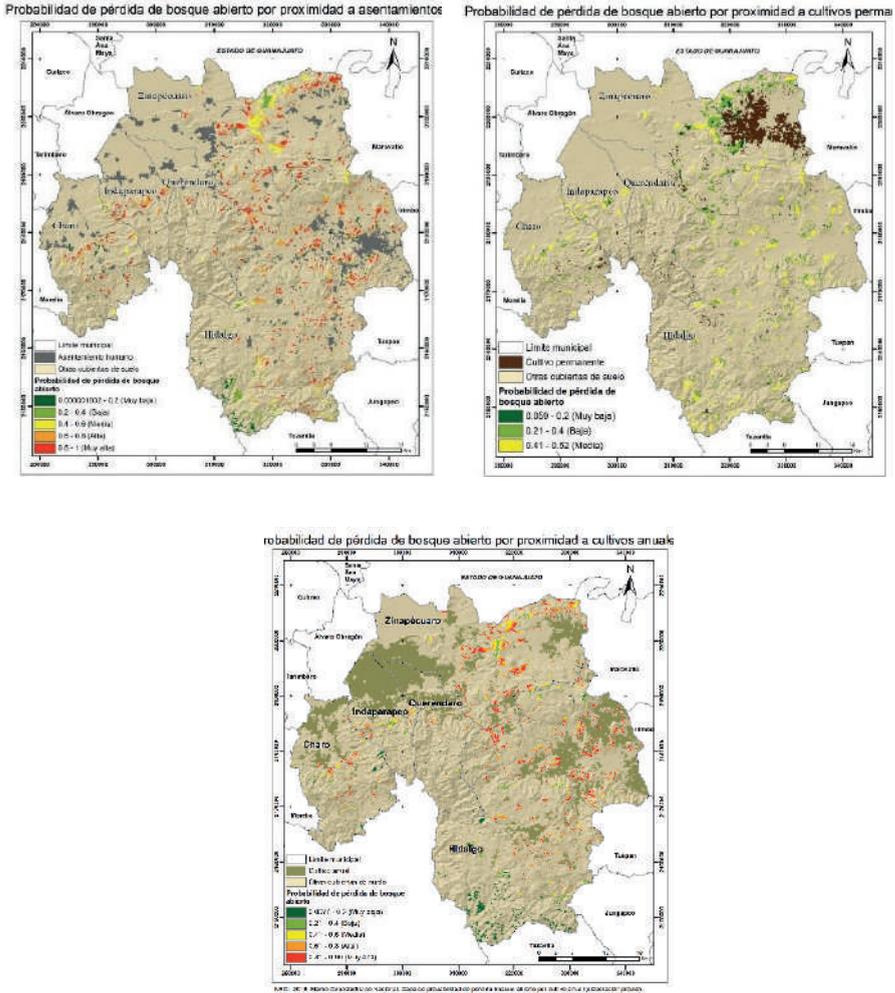
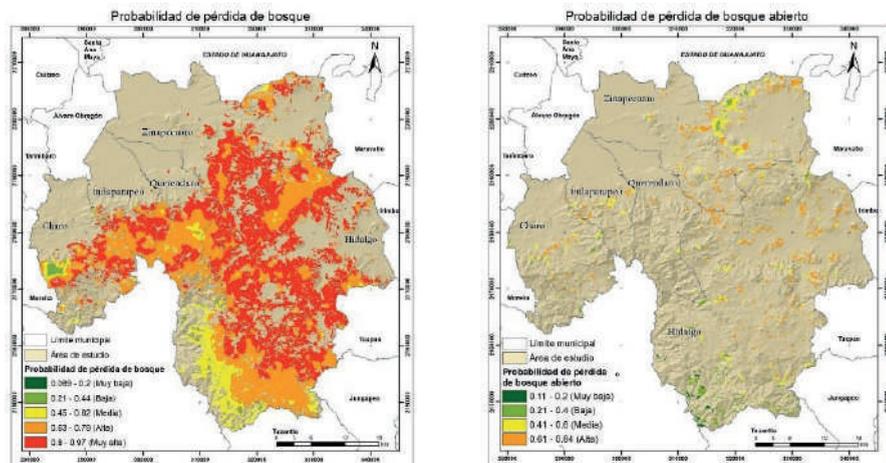


Figura 7. Probabilidad de pérdida de bosque abierto por cada parámetro.

## 4. Discusión y conclusiones

### 4.1 Cambios en la cubierta forestal en el área de estudio

En el análisis de los resultados en relación con la pérdida forestal, se identifica que, en estos años, el cambio de uso de suelo fue el principal factor que detonó la disminución del bosque, y en algunas zonas este comenzará también a ser bosque abierto. Principalmente, la ubicación de nuevos asentamientos es uno de los factores que detonan la proliferación de otros usos suelo como son los cultivos y caminos nuevos para tener accesibilidad a otras poblaciones o



**Figura 8.** Probabilidad integral de pérdida de bosque y bosque abierto.

actividades económicas. La pérdida de bosque en mayores proporciones se presenta en los municipios de Zinápécuaro e Hidalgo.

Lo que se esperaba era que la relación de proximidad de asentamientos humanos a bosque y a bosque abierto fueran el parámetro importante, ya que a medida que las poblaciones comienzan a aumentar, se expanden a lo largo del territorio o bien ocupan otros espacios y cambian los usos o cubiertas de suelo. Como segundo parámetro relevante cabría esperar la proximidad a cultivos permanentes y anuales y, como tercero, la proximidad a caminos. Pero para cada caso fue distinto, y en los resultados de la relevancia se demostró que cada clase de cubierta forestal tiene factores detonantes de pérdida diferentes a lo largo del tiempo.

#### 4.2 Resultados del análisis paramétrico

La construcción del modelo DEFORELATIONS fue uno de los objetivos logrado en este estudio y además los niveles de probabilidad de las áreas susceptibles a la pérdida forestal (Tablas 7 y 8) de cada parámetro obtenido.

En lo que respecta a la probabilidad muy alta de pérdida de bosque, la proximidad de cultivos permanentes resultó ser el factor de mayor importancia, continuando con la proximidad a los asentamientos humanos y a la proximidad de caminos. Para la probabilidad muy alta de pérdida de bosque abierto, los parámetros que contribuyen en mayor medida a esta pérdida son la proximidad a los asentamientos humanos seguidos por la proximidad a cultivo anual.

Esto arroja que las probabilidades de pérdida de bosque y bosque abierto, en ambos casos están relacionadas con la proximidad a asentamientos humanos.

**Tabla 7.** Probabilidad de pérdida de bosque

<i>Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a:</i>	<i>Superficie con Probabilidad alta (ha)</i>	<i>% de superficie respecto al total de bosque 2015</i>	<i>Superficie con Probabilidad muy alta (ha)</i>	<i>% de superficie respecto al total de bosque 2015</i>
Cultivo anual	17,490.9	16	30,179.79	28
Caminos	40,952.91	38	56,088.82	53
Asentamiento humano	24,058.27	23	60,714.73	57
Cultivo permanente	21,121.99	20	84,620.68	79

**Tabla 8.** Probabilidad de pérdida de bosque abierto

<i>Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a:</i>	<i>Superficie con Probabilidad alta (ha)</i>	<i>% de superficie respecto al total de bosque 2015</i>	<i>Superficie con Probabilidad muy alta (ha)</i>	<i>% de superficie respecto al total de bosque 2015</i>
Asentamiento humano	2,699.11	23	4,685.66	41
Cultivo anual	2,335.84	20	4,580.75	40
Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a:	Superficie con probabilidad media	% de superficie respecto al total de bosque abierto 2015		
Cultivo permanente	5,237.17	45		

### 4.3 Resultados del análisis sintético

Con este análisis del modelo DEFORELATIONS, se logra obtener otro objetivo en la investigación que es tener la probabilidad integrada de las áreas forestales susceptibles a la pérdida de bosque y bosque abierto. En la Tabla 9 se muestran los niveles de probabilidad de bosque y bosque abierto.

**Tabla 9.** Probabilidad integral de pérdida de bosque

Probabilidades	Superficie con Probabilidad alta (Has.)	% de superficie	Superficie con Probabilidad muy alta (Has.)	% de superficie
Probabilidad de pérdida de bosque	40952.9095	38.37	56089.3932	52.55
Probabilidad de pérdida de bosque abierto	5713.81618	49.58		

Se esperaría que los bosques abiertos tuvieran una pérdida con mayor grado de probabilidad que los bosques cerrados, por estar más cerca de asentamientos humanos y por estar degradados. Pero, comparando la proporción de superficie de cada una de ellas, la superficie del bosque del 2015 es de 106,733.13 hectáreas y para el bosque abierto es de 11,525.55, por lo que la pérdida de bosque será más significativa en términos de superficie.

El patrón futuro de probabilidad de pérdida forestal encontrada según el modelo sintético elaborado para esta región va a depender de que los parámetros analizados continúen también con los mismos patrones que se encuentran actualmente. Sin embargo, puede haber otros factores que no se puedan analizar en este modelo, como son las decisiones o el comportamiento de las poblaciones al momento de elegir un lugar para hacer el cambio de uso de suelo. Otro factor que quizá pueda contribuir es la existencia la ganadería extensiva o alguna otra variable que no se haya considerado para el modelo.

#### 4.4 Muestras de campo en algunas zonas para verificar resultados

En febrero del 2020 se realizó una salida con algunos puntos de verificación, solo para tener una idea aproximada de si en los últimos cinco años se tuviera algún cambio importante en la cubierta forestal no observado previamente durante el período estudiado. La toma de fotografías en los puntos de verificación se hizo con un dron. En la Figura 9 se aprecian los puntos de verificación. En el punto 1 (parte sur de Zinapécuaro) se observa la presencia de cultivos permanentes en este caso el aguacate, además de que ya se comienzan a apreciar partes con deforestación y caminos nuevos para ingresar a la zona del bosque, justamente se aprecia el patrón de que los pobladores ingresan en las partes altas del bosque sin ninguna limitante en altitud del terreno. En el punto 2, nuevamente se presenta los cultivos de aguacate y caminos y se distingue la pendiente del terreno no es una limitante para la inserción de cultivos. En la zona sur de Queréndaro (punto 3) se apreció que también cultivos de aguacate y se observa porque no hay un conocimiento de que orientación de las laderas son más favorables para los cultivos permanentes. Por último, en el punto 4 se aprecia un incendio justo para cambiar el uso del suelo en esa zona.

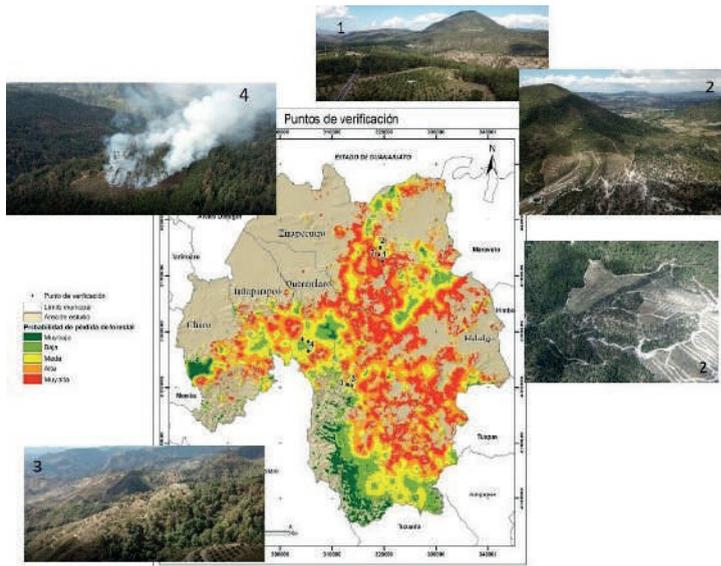


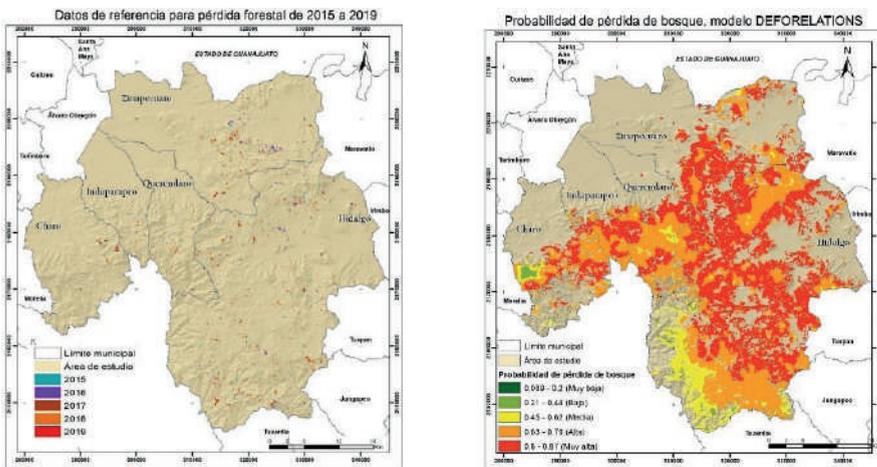
Figura 9. Puntos de verificación.

La verificación visual realizada, confirma que en el municipio de Zinapécuaro en la actualidad hay un incremento significativo de las zonas de cultivo permanente.

Con estas zonas de verificación, se comprueba que efectivamente se está presentando la pérdida forestal en los resultados de probabilidad de pérdida forestal.

#### 4.5 Evaluación del modelo sintético

En la Figura 10 se ilustra el conjunto de datos de referencia utilizado. Estos señalan las áreas de pérdida forestal para los años 2015-2019, estas zonas se obtuvieron de los datos de Hansen *et al.* (2013) del periodo del 2000 a 2019, descargando las imágenes y filtrando las fechas a utilizar para sobreponer cada año sobre la probabilidad de pérdida de pérdida de bosque del modelo sintético. Los datos están representados por celdas con resolución de 27 metros, cuyos valores indican el año de detección de la pérdida.



**Figura 10.** Resultados de la evaluación del modelo sintético.

Una primera evaluación de la fiabilidad del modelo se obtiene agregando los datos anuales 2015-2019 de pérdida forestal de Hansen para darles el valor de 1, y a continuación multiplicando esta agregación por el mapa de probabilidad sintética del modelo DEFORELATIONS, para extraer la probabilidad de pérdida para cada celda del mapa de Hansen. El total de superficie de pérdida para este período reportada por Hansen para el área de estudio es de 2,719.08 Has. A fin de facilitar la interpretación se agruparon los datos de probabilidad, así obtenidos, en las cinco clases de probabilidad de pérdida: de 0 a 0.2 probabilidad muy baja, de 0.2 a 0.4 probabilidad baja, 0.4 a 0.6 probabilidad media, 0.6 a 0.8

probabilidad alta y 0.8 a 1.0 muy alta. Estos resultados se clasificaron según las cinco clases de probabilidad de pérdida del modelo DEFORELATIONS (Tabla 10), y se calculó la superficie en hectáreas para cada clase y el porcentaje que representan cada una de ellas respecto al total de hectáreas de pérdida reportadas por Hansen para el período 2015–2019.

**Tabla 10.** Proporción de pérdida forestal según Hansen *et al.* (2013) clasificada según la probabilidad de pérdida dado por el modelo DEFORELATIONS para los años 2015-2019 tomados en forma desagregada

<i>Clase de pérdida</i>	<i>Porcentaje 2015</i>	<i>Porcentaje 2016</i>	<i>Porcentaje 2017</i>	<i>Porcentaje 2018</i>	<i>Porcentaje 2019</i>
Muy baja	0	0	0	0	0
Baja	0	0	0	0.2	0.1
Media	7.5	4.2	6	7.3	13.7
Alta	45.1	40.1	40.3	42	35.8
Muy alta	47.4	55.7	53.7	50.5	50.4
Total	100	100	100	100	100

Se confirma la capacidad y fiabilidad de predicción del modelo DEFORELATIONS, ya que, de los cinco años analizados, cuatro de ellos muestran que la probabilidad Muy Alta de pérdida de cubierta forestal es de poco más del 50% y el otro año está muy cerca de esta cifra. Asimismo, si se suman las clases de Alta y Muy Alta probabilidad, en todos los años el porcentaje de acierto en la predicción es superior al 90%, llegando hasta el 95% para el año 2016.

#### 4.6 Evaluación de los modelos paramétricos

De la misma manera en que se evaluó el modelo sintético, se realizó el mismo procedimiento utilizando las áreas de pérdida de forestal detectadas por Hansen *et al.* (2013), para los años 2015-2019, para la evaluación del modelo paramétrico en la pérdida de bosque. A continuación, se muestran los resultados de cada parámetro.

**Tabla 11.** Proporción de pérdida forestal según Hansen *et al.* (2013), clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a asentamientos humanos, para los años 2015-2019 tomados en conjunto

<i>Clase de pérdida</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy baja	43.30	2.16
Baja	131.34	6.54
Media	189.35	9.43
Alta	507.31	25.28
Muy alta	1135.56	56.58
Total (Hansen)	2006.56	100

**Tabla 12.** Proporción de pérdida forestal según Hansen *et al.* (2013) clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a cultivos permanentes, para los años 2015-2019 tomados en conjunto

<i>Clase de pérdida</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy baja	0.00	0.00
Baja	0.00	0.00
Media	0.00	0.00
Alta	49287	24.49
Muy alta	1519.68	75.51
Total (Hansen)	2012.56	100

**Tabla 13.** Proporción de pérdida forestal según Hansen *et al.* (2013) clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a cultivos anuales, para los años 2015-2019 tomados en conjunto

<i>Clase de pérdida</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy baja	521.20	25.95
Baja	268.49	13.37
Media	339.43	16.90
Alta	319.66	15.91
Muy alta	560.03	27.88
Total (Hansen)	2008.81	100

**Tabla 14.** Proporción de pérdida forestal según Hansen *et al.* (2013) clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a caminos, para los años 2015-2019 tomados en conjunto

<i>Clase de pérdida</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy baja	0.66	0.03
Baja	6.18	0.31
Media	8.21	0.41
Alta	67.55	3.36
Muy alta	1929.53	95.89
Total (Hansen)	2012.13	100

En el caso de la fiabilidad de los modelos paramétricos, la coincidencia de la pérdida forestal de 2015 a 2019 (Hansen *et al.*, 2013) con cada una de las clases de probabilidades de pérdida de los parámetros, señalan que, espacialmente, los parámetros pueden tener una importancia ligeramente diferente a aquella indicada por la relevancia estadística. En esta validación paramétrica, los modelos resultaron nuevamente muy acertados para las clases de probabilidad Alta y

Muy Alta de pérdida forestal: la proximidad a asentamientos humanos tuvo un 81% de acierto, la proximidad a los cultivos permanentes un 94%, la proximidad a los cultivos anuales un 94% y la proximidad a los caminos un 98%. Los hallazgos de este estudio son consistentes con la validación, además que muestra que efectivamente el nivel de relevancia estadística de cada una de las relaciones coincide en la manera en que éstas pueden ser empleadas en la predicción de la pérdida forestal en esta región. Cabe destacar que la proximidad de las zonas forestales a las zonas de cultivo permanente en las pruebas estadísticas resultó un parámetro estadísticamente relevante (92% de confianza), cuando este se valida con la temporalidad de 2015 a 2019 se obtiene que efectivamente se tiene pérdida forestal en estas zonas. Por lo tanto, este parámetro resulta un mejor predictor espacial de lo que su relevancia estadística indicaba para los años 1994-2015 que se emplearon para la construcción del modelo.

#### **4.7 Aplicabilidad del modelo DFORELATIONS en otras áreas de estudio**

El modelo es por necesidad específico a cada región geográfica a estudiar, por ello en cada zona de estudio no se debe aplicar considerando las mismas variables o el mismo comportamiento de las variables. Cada variable se comporta de manera diferente dependiendo del área de estudio. Un claro ejemplo de estas diferencias al aplicar el modelo se puede apreciar en otras dos investigaciones realizadas con el modelo DFORELATIONS la de Vizcaino (2013) y Reyes (2014), ya que cada investigador elige las relaciones espaciales que considera pertinentes y que están relacionadas con la pérdida forestal en una cierta región geográfica. En el caso particular de esta investigación se tomaron más relaciones espaciales que en los otros estudios y no se realizó en dos zonas distintas, sino en la misma región, con la diferencia adicional de desagregar el modelo para dos tipos de cubierta forestal, el bosque y bosque abierto. Lo que deja a reflexionar que cuantas más relaciones espaciales se incluyan en el modelo es posible detectar más factores que están influyendo en la pérdida forestal. También, de que los insumos básicos para esta investigación en su mayoría fueron obtenidos por elaboración propia, por interpretación de imágenes de ambas fechas a escala 1:20,000, mientras que los otros estudios utilizaron cartografía existente del uso y cubierta del suelo a escala 1: 250,000. Esto último lleva a considerar que también la escala del estudio es un factor importante en la forma que se obtienen resultados del modelo.

El modelo DFORELATIONS no es un modelo único. Es necesario construir diferentes modelos para diferentes zonas geográficas y / o períodos de tiempo.

Por último, el estudio ha demostrado con éxito que el modelo DFORELATIONS para nuestra zona de estudio predice de manera sobresaliente, en la mayoría de los casos, la pérdida forestal. Esto nos lleva a concluir que los parámetros del modelo tienen una serie de implicaciones importantes para la futura práctica de la conservación del bosque y es ahí donde se podrían aplicar medidas de intervención.

## Bibliografía

- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., ... & Townshend (2013) High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Results from time-series analysis of Landsat images in characterizing global forest extent and change from 2000 through 2021. *Science*, 342 (6160), 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.12488>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (1994). Ortofotos. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2013). Estadísticas a propósito del día mundial forestal, 12 pp. <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadisticas/2013/forestal0.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (1994). Ortofotos. [https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes\(2007a\)](https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes(2007a)). Conjunto de datos vectoriales de Edafología, serie II. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (1994). Ortofotos. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes> (2007b) Conjunto de datos vectoriales de Unidades Climáticas. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (1994). Ortofotos. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes> (2010) Conjunto de datos vectoriales de la Red Hidrográfica. <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (1994). Ortofotos. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes> (2013) Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, serie V. <https://www.inegi.org.mx/temas/usuarios>
- Mas, J. F., Bocco-Verdinelli, G., Burgos-Tornadu, A., Cuevas, G., Navarrete-Pacheco, J. A., Ramírez-Ramírez, I. & Velázquez-Montes, J. A. (2016) Proyecto de Investigación Monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el Estado de Michoacán: un análisis de cambios mediante sensores remotos a escala regional. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Morelia, Michoacán. <https://www.ciga.unam.mx/wrappers/proyectoActual/monitoreo/index.html>
- Morales Manilla, L. M., Reyes García, A., Cuevas García, G. & M. Onchi R. (2012). *Inventario 2011 del cultivo del aguacate en el estado de Michoacán*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (UNAM)-COFUPRO, Morelia, Michoacán, 89 pp.
- Morales Manilla, L. M. (2013). Using spatial relations as parameters to explain and predict the loss of forest cover, the DEFORELATIONS model.
- Morales Manilla, L. M. (2014). *Definición de a minimum set of spatial relations* [Tesis de Doctorado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM], México.
- Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (2015) Imágenes LANDSAT. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- (2018). Modelo Digital de Elevación. DEM ASTER GDEM. <https://search.earthdata.nasa.gov/search/>
- Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura (1998). *Términos y definiciones. Clasificación de la Tierra*. [http://www.fao.org/3/ae217s/ae217s02.htm#P78\\_4608](http://www.fao.org/3/ae217s/ae217s02.htm#P78_4608)
- (2016) *Evaluación de los recursos naturales 2015*. <http://www.fao.org/3/a-i4793s.pdf>

- Registro Agrario Nacional (2018). Datos geográficos perimetrales de los núcleos agrarios certificados por estado. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/datos-geograficos-perimetrales-de-los-nucleos-agrarios-certificados-por-estado--formato-shape>
- Reyes González, A. (2014). *Análisis comparativo de los patrones espaciales de la deforestación en una zona tropical y una templada de Michoacán* [Tesis para el grado en Maestro en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México], México.
- Rosete V. F., Pérez D. J. & Bocco G. (2008). Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones Geográficas*, 67, 39-58. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112009000200004&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112009000200004&script=sci_arttext)
- Servicio Meteorológico Nacional (2010). *Clima en México*. [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=103&Itemid=80](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80)
- Vizcaino, G. M. J. (2013). *Comparación de los patrones de deforestación en dos regiones de Latinoamérica*. [Tesis de Maestría para el grado de Maestra en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México], México.



# Los nuevos corredores en altura en la Ciudad de México. Análisis de su proceso, aplicación y visualización en un Sistema de Información Geográfica

The new corridors in height in Mexico-City. Analysis of its process, application and visualization in a Geographic Information System

Víctor Hugo Aquino Illescas<sup>1</sup>

*Recibido 26 de septiembre de 2022; aceptado 17 de noviembre de 2022*

## RESUMEN

El estudio de la dinámica espacial urbana genera una aproximación de gran importancia en la investigación científica, cuya finalidad es determinar la evolución de los modelos y patrones de distribución espacial en la revalorización de usos de suelo. La disposición espacial de ejes o corredores longitudinales en altura con funciones de centralidad en la Ciudad de México se ha ido conformando a través del tránsito de la estructura urbana monocéntrica de la metrópoli de mediados del siglo XX, transitado entre 1950 y 1980 por una etapa de múltiples centralidades jerarquizadas, hacia la de una trama compleja de corredores urbanos terciarios y residenciales de alto costo económico que hoy la organizan. El trabajo pretende desarrollar históricamente la configuración socio-territorial de la Ciudad de México que transita, hoy día, hacia formas multinucleares de organización, estructuración y funciones de centralidad, enmarcados por el actual auge inmobiliario en altura; para visualizar la configuración territorial se procede a la construcción de bases de datos georreferenciadas a partir de información estadística oficial y su posterior vinculación a un Sistema de Información Geografía como herramienta orientada para la gestión y creación de productos cartográficos de análisis espacial y superposición cartográfica. En este sentido, los resultados estadísticos y cartográficos permiten evaluar que la magnitud y alcance de los cambios de usos mixtos de suelo, enfocados en

<sup>1</sup> Departamento de Sociología, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, México, correo electrónico: [vhugaillescas@xanum.uam.mx](mailto:vhugaillescas@xanum.uam.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8741-4473>.

determinar la distribución espacial de los nuevos nodos y corredores en altura, avanzan principalmente hacia la zona poniente de la ciudad, complementando en gran medida la centralidad de los corredores urbanos tradicionales.

*Palabras clave: verticalización, reestructuración urbana, análisis espacial, Sistema de Información Geográfica, Ciudad de México.*

## **ABSTRACT**

The study of urban spatial dynamics generates an approach of great importance in scientific research, whose purpose is to determine the evolution of models and patterns of spatial distribution in the revaluation of land uses. The spatial arrangement of longitudinal axes or corridors in height with functions of centrality in Mexico City has been shaped through the transit of the monocentric urban structure of the metropolis in the mid-20th century, transited between 1950 and 1980 through a stage of multiple hierarchical centralities, towards that of a complex web of tertiary and residential urban corridors of high economic cost that organize it today. The work aims to historically develop the socio-territorial configuration of Mexico City that is currently moving towards multi-nuclear forms of organization, structuring and functions of centrality, framed by the current high-rise real estate boom; To visualize the territorial configuration, georeferenced data-bases are built from official statistical information and their subsequent link to a Geography Information System as a tool for the management and creation of cartographic products for spatial analysis and cartographic overlay. In this sense, the statistical and cartographic results allow us to evaluate that the magnitude and scope of the changes in mixed land uses, focused on determining the spatial distribution of the new nodes and corridors in height, advance mainly towards the western area of the city, largely complementing the centrality of traditional urban corridors.

*Key words: verticalization, urban restructuring, Spatial analysis, Geographic Information System, Mexico City.*

## **1. Introducción**

En la tendencia actual de los estudios urbanos, confluyen disciplinas como el urbanismo, la planificación urbana, la cartografía, la sociología, la economía, la geomática y la geografía. Cada vez intervienen un mayor número de disciplinas; el reto de explicar la complejidad del fenómeno urbano es cada vez mayor. Numerosos estudios se centran en las funcionalidades de las ciudades o en los rangos de éstas en cuestiones internacionales como el paradigma de la ciudad global, los espacios domésticos, la desigualdad social, la vulnerabilidad y los riesgos (Stevens, 2012, p. 132).

Al estudiar una ciudad y su área metropolitana se analizan un conjunto de centros de diferente tamaño, funcionalmente integrados, cuestionándose su formación, su articulación, su dinámica, su crecimiento, y su organización espacial. La expansión urbana y la complementariedad de funciones entre los centros han generado un territorio metropolitano o agrupaciones de núcleos que pueden

organizarse en distintos tipos de estructuras. Así se entendería que un área metropolitana es un centro social, económico, político y administrativo, con núcleos urbanos estrechamente relacionados entre sí, conformando una unidad funcional. Entre estos obviamente existen flujos y especializaciones de bienes y servicios, que dan forma a una organización jerárquica, donde cada núcleo tiene una función más desarrollada que el otro, generando un sistema interdependiente (Rojas *et al.*, 2009, p. 48). Algunas funciones pueden conformar áreas altamente especializadas; destacan las zonas dormitorio, distritos de negocios, comerciales y corporativos, pero todas están interrelacionadas a través de los mercados de trabajo, la vivienda y las vías de comunicación, teniendo a su vez gran capacidad para polarizar el espacio circundante.

Dentro de la historia de las transformaciones urbanas en las ciudades, en los últimos años los estudios sobre verticalización urbana han despertado un interés por abordar cuestiones sobre la forma de hacer ciudad y sus esquemas de desarrollo. Edward Glaeser (2011), uno de los autores más influyentes en el tema del modelo de las ciudades densas, expone en su libro *El triunfo de las ciudades* que la densidad y la proximidad, propios del entorno urbano, promueven la colaboración y facilitan la creatividad e innovación. Enfatiza que la densa aglomeración ha sido el motor del conocimiento, por lo que la ciudad es el lugar donde se producen nuevas ideas. En contra del desarrollo disperso altamente dependiente del automóvil, el autor sostiene que un entorno urbano denso es más ecológico y amigable con el ambiente.

De acuerdo a Herce (2013, p. 356), el principal problema con que se enfrentan las sociedades urbanas es el de la dispersión urbana heredada; grandes cantidades de población viviendo en espacios de tan poca densidad que será imposible suministrarles servicios en un contexto de creciente escasez de recursos. Ante tal desafío, la única respuesta posible es la concentración, el incremento de densidad desde un enfoque de sostenibilidad; sin embargo como resalta, es más fácil de exponer que de realizar. De tal suerte, la ciudad compacta frente a la ciudad dispersa es un debate recurrente a lo largo de la historia de las transformaciones urbanas y las estrategias para intervenir en ellas por medio de una serie de modelos, instrumentos y planes normativos. Si bien los procesos de expansión han tomado el protagonismo en la discusión actual, las formas de la ciudad compacta nunca han dejado de representar una preocupación. La edificación en altura, por ende, pone en marcha desarrollos de densificación o compactación de tejidos urbanos. La verticalización de áreas centrales es parte de una transición hacia formas más densas, con la consecuente redefinición de la situación urbana preexistente (Costa, 2000; Silva, 2004; en Fedele, 2015, p. 68).

Entre los aportes más importantes de este trabajo se incluye un análisis de los nuevos subcentros y corredores urbanos con edificación en altura como nuevos símbolos de la modernidad urbana en la Ciudad de México (CDMX). Para manifestar la transformación socioeconómica y espacial de los nuevos corredores se procedió metodológicamente a la compilación y gestión de datos estadísticos disponibles en páginas oficiales como el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), de revistas especializadas sobre mercado inmobiliario tales como CNN

Expansión (<https://expansion.mx>) y Real Estate Market ([www.realestatemarket.com.mx](http://www.realestatemarket.com.mx)), de páginas web emporis.com y edemx.com, así como de la plataforma Google Earth y herramientas de procesamiento y análisis espacial dentro de un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.4 y QGIS 2.8) para la elaboración de los productos cartográficos. El estudio abarca una vertiente multitemporal —desde 1940 hasta el 2018. Los resultados se orientan a generar información actualizada del comportamiento de proyectos inmobiliarios en altura y su ubicación geográfica dentro del área de estudio en el periodo analizado, constituyéndose en una valiosa herramienta de base para el diagnóstico territorial y la especialización socio-económica que acontece en la CDMX.

El surgimiento de los edificios en altura es una de las más importantes transformaciones de las formas territoriales del espacio metropolitano. En estas zonas predominan los usos de suelo terciarios y residenciales de alto costo económico, que dan lugar a una revalorización del espacio urbano con la proliferación de nuevos objetos urbanos, tales como centros comerciales, hipermercados, exclusivas urbanizaciones cerradas, nuevos distritos de negocios o formación de redes de distritos corporativos y localizaciones de actividades globalizadas. Uno de los principales resultados del proceso de la verticalización corporativa y residencial es el resquebrajamiento en la interacción de los diferentes grupos sociales, interacción que está determinada por la capacidad de consumo y por el interés de uso que se tenga sobre estos nuevos subcentros y corredores urbanos de marcada centralidad.

## **2. Perspectiva teórica y conceptual (marco conceptual)**

### **2.1 Modelos urbanos**

Cuando se hace referencia a estudios relacionados con la estructuración urbana se ponen en relieve los modelos urbanos. Los modelos como abstracciones de la realidad tienen una amplia tradición en Sociología, Economía y Geografía. Con diferentes modelos, teorías, técnicas y diferentes resultados varios autores como Burgess, Hoyt, Harris y Ullman, trataron de representar los principios de la estructura socioespacial de las ciudades estadounidenses. Otros estudios se difunden por el creciente desarrollo de técnicas cuantitativas, bajo la premisa de que los hechos que dan cuenta de la realidad urbana, se articulan según las reglas de la lógica matemática. Destacan el Análisis de Áreas Sociales que intenta sistematizar la realidad mediante la utilización de metodologías multivariadas y la introducción de parámetros estadísticos, y el Análisis Factorial que presupone la existencia de un factor común que explica al conjunto de variables, por lo que se centra en analizar la varianza común de cada variable; los trabajos de Shevky y Bell y Frank Sweetser entre 1960 y 1965 son ilustrativos.

Después de la segunda guerra mundial algunos autores alemanes desarrollaron modelos urbanos en diferentes regiones culturales; en 1976, geógrafos alemanes contribuyeron con modelos de ciudad latinoamericana, diferentes en detalles, pero parecidos en su representación principal (Borsdorf, 2003, p. 136). En este contexto,

bajo un enfoque de cambios en la estructura urbana, las investigaciones centraron su análisis en actividades económicas y usos de suelo. Mertins (1995) propuso la abstracción de la ciudad latinoamericana, cargada de una visión historicista del proceso de urbanización de estas ciudades, utilizando elementos como los asentamientos humanos y las estructuras de los usos de suelo urbano. Estos geógrafos alemanes propusieron una estructura antigua de anillos concéntricos (retomando a Burgess) adaptada a las ciudades latinoamericanas, con una estructura moderna sectorial, una estructura celular en la periferia. Bajo este enfoque, la estructura al interior de las ciudades latinoamericanas se interpreta como una ciudad difusa, que da pie a la creación de zonas exclusivas —fraccionamientos y zonas residenciales cerradas— asociadas a grandes centros comerciales como nuevas centralidades suburbanas de comercio y servicios (Borsdorf, 2003).<sup>2</sup>

Desde otra perspectiva, Griffin y Ford (1980) construyeron un modelo monocéntrico donde la descentralización se limitaba a un corredor comercial que partía de la zona central hacia la periferia. Si bien, el Distrito Central de Negocios (DCN) en las ciudades latinoamericanas siempre ha sido el centro económico y administrativo de la ciudad, no fue sino hasta después de la década de 1930 que entra en una nueva dinámica de funciones. El crecimiento demográfico detona la expansión de las ciudades modernas, contribuyendo a la ampliación de calles y avenidas, demolición de viejas construcciones, lotificación de predios, construcción de rascacielos de oficinas y residenciales, centros comerciales, terminales de autobuses, hoteles, restaurantes, y otras infraestructuras en los alrededores del DCN (Griffin y Ford, 1980, p. 400). Este modelo resaltaba un DCN con servicios altamente especializados y gran accesibilidad; un sector residencial para las clases media-alta y alta, y un corredor comercial para bienes y servicios, y edificios de oficinas, y por último unas zonas residenciales bien localizadas con mejores servicios urbanos; la zona intermedia de acrecentamiento *in situ*; y la zona de asentamientos marginales periféricos, con los peores o nulos servicios (*Ibíd.*, p. 411).

En esta producción del espacio urbano, las transformaciones de la ciudad no sólo implican recomposición de lo ya edificado, o la expansión física territorial, sino también nuevos desarrollos en lugares nuevos o aislados. La creación de nuevas centralidades que aparecen por fuera del área tradicional de la ciudad es una tendencia. Estos puntos de concentración de provisión de servicios, superficies de oficinas y comercios son denominados *edge cities* (Garreau, 1991, en Janoschka, 2004), y entran en una dinámica de competencia de actividades económicas y funciones con el centro histórico tradicional.

Otros modelos urbanos como el desarrollado por Crowley (1995), contribuyen a la comprensión de la estructura de la ciudad latinoamericana acentuando la

<sup>2</sup> La palabra *centro* deriva del latín *centrum*, y este del griego *κέντρον* (aguijón) que es la punta del compás, el punto base para trazar la circunferencia. Su etimología se vincula con la geometría euclidiana, que considera al centro punto equidistante de todos los lados, porción concreta del espacio con una posición determinada. Con ello, además de su localización y su posición, el centro adquiere aspectos funcionales, jerárquicos y simbólicos (Paris, 2013).

relativa ausencia de control gubernamental sobre el uso del suelo y la posterior mezcla orgánica de las funciones residencial, comercial e industrial, que es característico de las ciudades mexicanas y centroamericanas (Pacione, 2005, p. 470). En función de lo anterior, se aprecia una notable descentralización de actividades económicas, con una distribución y dispersión policéntrica a partir de corredores y núcleos que favorecen un patrón de crecimiento discontinuo característico de la periurbanización (Cruz y Garza, 2014, p. 17).

Después de un mayor desarrollo en las ciudades latinoamericanas, en 1996 nuevamente Ford incorpora a su modelo de estructura urbana la división territorial de la nueva ciudad central entre el DCN y un mercado; considera la competencia y complementariedad entre nuevos nodos suburbanos, la reubicación de la industria, la importancia de las vialidades periféricas, la adición de áreas indefinidas de viviendas de clase media, normalmente situadas lo más cerca posible al sector de clases acomodadas y al periférico, y el establecimiento de la elitización residencial (gentrificación) de distritos o barrios para atraer turistas, artistas y elites locales (Ford, 1996, p. 439).

Poco después, Borsdorf (2003) modeló las dinámicas de la estructuración urbana, definiendo cuatro etapas del desarrollo de los asentamientos urbanos latinoamericanos: 1) ciudad colonial (de 1500 hasta 1820); 2) ciudad sectorial (1820 a 1920); 3) ciudad polarizada (1920 a 1970); y 4) ciudad fragmentada (desde 1970). Enfocándose uno en la actual etapa de ciudad fragmentada, los procesos económicos y de planificación urbana cambiaron a un nuevo patrón de acumulación de capital basado en el neoliberalismo, con fuerte influencia de la globalización. La flexibilización del Estado, la privatización y la desregulación permitieron a los inversores y planificadores mayores libertades. La dinámica urbana entra bajo el principio de la fragmentación, como nueva forma de separación de funciones y elementos socio-espaciales, ya no en una dimensión grande, sino en una dimensión pequeña (*Ibid.*). Por tanto, los patrones espaciales viven un proceso de fragmentación de estructura y funciones, identificándose en las ciudades nuevas áreas de actividad económica o nuevas centralidades.<sup>3</sup>

Con base en los modelos urbanos expuestos, se reflexiona que entre los muchos aspectos de la realidad urbana abordados, este interés general sobre el proceso de crecimiento demográfico, socioeconómico y físico de las ciudades tiene como preocupación central el tránsito de la ciudad compacta tradicional a la ciudad dispersa y fragmentada (Pradilla, 2015, p. 2). Actualmente, las grandes urbes como la CDMX son transformadas en su estructura urbana bajo el principio de fragmentación territorial que determina la dispersión de la infraestructura y funciones urbanas. El impulso de nuevas polaridades, nodos de actividades y nuevas centralidades con soporte en las redes de infraestructuras física, energética

3 El centro tradicional remite a las distintas jerarquías y funciones de centralidad que ese espacio ha ejercido y ejerce en relación con el conjunto de una ciudad, por lo que debe analizarse en relación con la ciudad en su totalidad. Entre las funciones de centralidad a destacarse se encuentran la simbólica que da identidad a una ciudad; la administrativa e institucional (gobierno); la de intercambio comercial, de centro de negocios (oficinas corporativas y bancarias, bolsa de valores); y la de sociabilidad urbana, entre otras (Coulomb, 2012, p. 27).

y virtual son consecuencia de este proceso, por lo que más allá de la existencia de modelos o patrones ideales normativos de ciudades en cuanto a su organización, funciones y configuración de la morfología urbana, se intenta develar sobre las contradicciones, problemas y necesidades que implica para los diversos actores y grupos sociales, el patrón específico de crecimiento seguido por cada metrópoli (Pradilla, 2011).

## **2.2 Edificación en altura y verticalización**

Este nuevo paradigma urbano, que se erige como movimiento urbano relevante de fines del siglo XX e inicios del XXI, patrocina el desarrollo de ciudades compactas con mezcla de usos de suelo, la densificación urbana, el impulso del transporte público, el fortalecimiento del concepto de hacer comunidad y el diseño orientado al peatón, con apego en cambiar los paradigmas urbanos por esquemas de ciudad más sustentables.

En este sentido, y a pesar de que se conoce que algunos procesos de renovación urbana solo atienden a intereses de las clases dominantes y de las grandes empresas (Töws y Mendes, 2011), la verticalización crea nuevas morfologías y formas de comportamiento urbano. Tal fenómeno sería el resultado de representaciones simbólicas del poder económico, estatus social, conveniencia, modernidad y como posibilidad de multiplicación del suelo urbano (Macedo, 1991, p. 68).

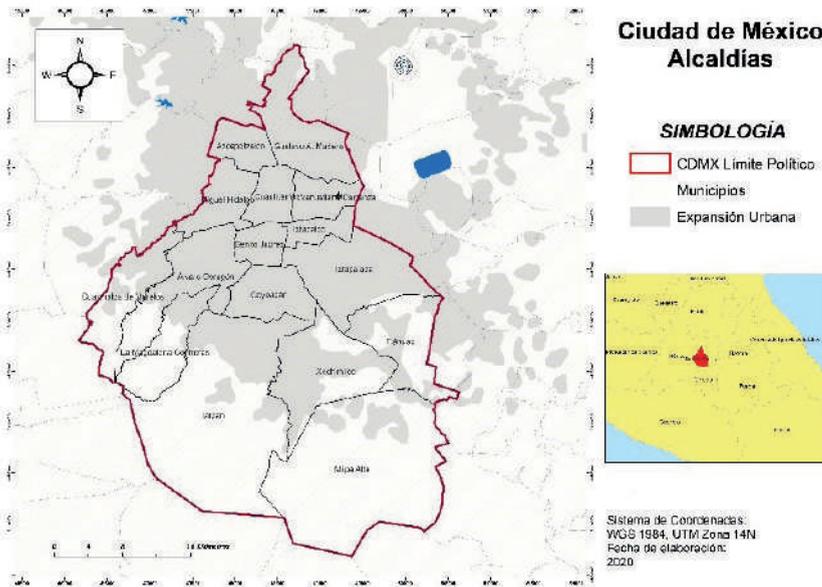
La diversidad y complejidad de intereses involucrados en la verticalización implica ir más allá de la idea de que las ciudades crecen solo porque son lugares con características de centralidad, que tienen la capacidad de aglomerar industria, comercio, empleo y vivienda o que poseen ejército de reserva. En realidad, las ciudades crecen porque hay una multiplicidad de intereses involucrados en ellas, entre los que se pueden nombrar enormes y lucrativos beneficios en la producción específica de espacios urbanos, públicos y privados (Souza, 1994, p. 246). Estos intereses son puestos en práctica por los diversos agentes que modelan y producen el espacio urbano. De esta forma, el espacio urbano ha sido producido y reproducido, gestionado por los agentes modeladores para reproducir las estructuras de poder y dominación en la sociedad, dando lugar a normas de comportamiento e imposición de formas de vida (Mendes, 2009, p. 20).

Este proceso de verticalización presente en las principales metrópolis del mundo, se relaciona igualmente con la cultura del consumo. Los aspectos verticales de la producción, experiencia y representación del espacio urbano son claramente fundamentales a la naturaleza de las ciudades actuales (Hewitt y Graham, 2015, p. 924), por lo que el proceso de verticalización urbana se materializa por medio del edificio. De acuerdo a lo planteado, Souza (1994, p. 247) entiende que el espacio es sobrevalorado por la instalación de edificios, ya que el proceso de verticalización va más allá de la construcción del edificio, tiene la capacidad de reproducir los diferentes tipos de capital. Sintetizado en la producción del edificio, la verticalización, indudablemente, conlleva estrategias complejas del proceso de producción capitalista en su dimensión más amplia.

Por su parte Ramires (1998, p. 98) resalta que la verticalización del espacio urbano representa una revolución en la forma de construir, que afecta la dinámica de acumulación y reproducción del capital en el sector de la construcción y el mercado inmobiliario. Por lo tanto, es posible a través de este capital producir diversos cambios en las formas y funciones del paisaje urbano en la ciudad con el mecanismo de la multiplicación del suelo vía revalorización del espacio urbano como resultado del aumento del potencial de aprovechamiento o uso de suelo.

### 3. Descripción del área de estudio

La CDMX (antes Distrito Federal, DF) es la entidad más pequeña del país con una extensión de mil 485 km<sup>2</sup>. Está integrada por dieciséis demarcaciones territoriales (alcaldías, antes delegaciones). Se constituye en el centro de mayor concentración de población a nivel nacional, con nueve millones 209 mil 944 habitantes (INEGI, 2020). Es uno de los centros económicos más importantes de Latinoamérica y a nivel nacional es el principal centro político, económico, social, académico, financiero, empresarial, turístico, cultural, de comunicaciones y entretenimiento. El área de estudio (Figura 1) de la presente investigación corresponde al perímetro administrativo de dieciséis alcaldías; éstas presentan diferencias graduales en cuanto al impacto generado por las profundas mutaciones en la estructura económica y la tendencia a la modernización arquitectónica y urbanística de diversas zonas de la ciudad.



**Figura 1.** Ciudad de México (DF); alcaldías (delegaciones).

Fuente: elaboración propia.

## **4. Consideraciones metodológicas**

Este trabajo consideró el análisis espacial desde un enfoque geográfico, por lo que reconoce la localización relativa por arreglos o relaciones entre los objetos en el espacio, la localización absoluta o geométrica en relación con las coordenadas geográficas de los objetos, así como de las relaciones del tipo de adyacencia, continuidad y contigüidad; en este sentido, el análisis espacial es un amplio conjunto de procedimientos de estudio de los datos geográficos, en los que se consideran sus características espaciales; destacan la localización y los atributos de los objetos como componentes del dato espacial (Stevens, 2012, p. 136).

La metodología cualitativa y cuantitativa implementada, como aspecto concreto en el diseño de esta investigación, contó con las siguientes fases:

### **4.1. Revisión bibliográfica**

Esta fase estuvo enfocada en un tratamiento de tipo cualitativo con base en búsqueda bibliográfica de fuentes primarias y secundarias que implicaron recabar literatura sobre los conceptos de centralidad y verticalización que justificaron el modelo de ciudad latinoamericana que busca nuevos nichos de mercado dentro de la metrópolis neoliberal, así como de literatura relacionada con el tema y documentos en línea. De igual manera, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva sobre investigaciones geográficas que han contribuido, con argumentos teóricos, al análisis de procesos de edificación en altura a nivel mundial, así como dentro del ámbito latinoamericano.

### **4.2. Consulta e identificación de información para la construcción de bases de datos y diagnósticos**

Esta fase incluyó la consulta de mapas y cartas antiguas de la CDMX a diferentes escalas cartográficas disponibles y facilitadas por la Mapoteca Orozco y Berra. Se realizó una búsqueda de información hemerográfica en revistas especializadas sobre mercado inmobiliario que resaltara construcciones en altura y notas periodísticas puntuales —CNN-Expansión ([expansion.mx](http://expansion.mx)), Real Estate Market ([www.realestatemarket.com.mx](http://www.realestatemarket.com.mx)), CBRE México ([www.cbre.com.mx](http://www.cbre.com.mx)), Avison Young Mexico City ([www.avisonyoung.mx/web/mexico-city](http://www.avisonyoung.mx/web/mexico-city))— y respecto a la di-námica del comportamiento inmobiliario del sector vivienda se consultó la página electrónica metros cúbicos, sitio web especializado en oferta de vivienda (<https://www.metroscubicos.com/>). Asimismo, se examinaron los marcos normativos y decretos de los programas de desarrollo urbano de la CDMX de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda SEDUVI.

### **4.3. Elaboración, análisis de bases de datos y productos cartográficos**

Esta etapa abarcó la elaboración de gráficas, mapas y material cartográfico con la información recabada en la fase ii. Los datos que se utilizaron para construir

las bases de datos sobre los principales proyectos históricos en altura en la CDMX fueron: fecha de realización, número de niveles, altura en metros, giros económicos, comerciales, usos de suelo y dirección (ubicación geográfica); la información procede principalmente de las páginas web emporis.com y edemx.com, y se complementó con verificaciones en campo.

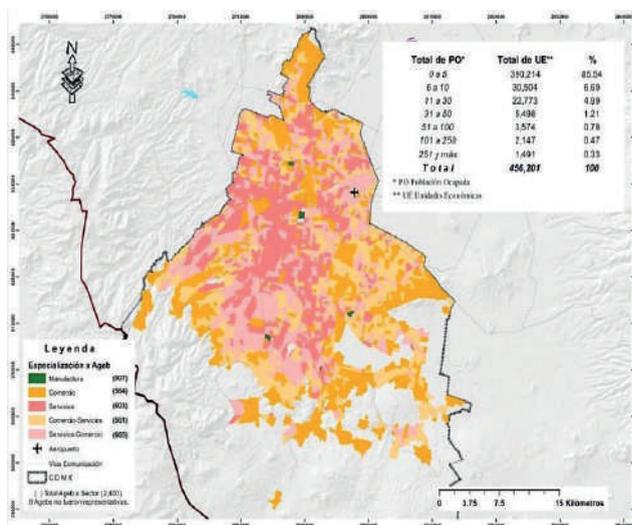
Tarea obligada era que cada uno de estos proyectos inmobiliarios (más de mil doscientos puntos) contara con la ubicación geográfica (georreferenciación) correspondiente como atributo con el fin de evaluar su localización e identificar a qué submercado correspondía; la plataforma Google Earth fue una herramienta tecnológica de gran utilidad para lograr este cometido. La elaboración de cuadros y gráficas para explicitar el comportamiento de subsectores terciarios de la economía, las Unidades Económicas (UE) y de la composición de la estructura sociodemográfica fue con base en información de índole demográfica y económica derivada del Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (INEGI.org.mx y el directorio de establecimientos DENUÉ (<https://inegi.org.mx/app/mapa/denue/>), institución encargada de la elaboración de los censos nacionales (1990, 2000 y 2010). Los softwares implementados para la sistematización (tratamiento, gestión y tabulación) de todos los datos recabados, conformados en bases de datos y las bases cartográficas para su posterior representación en mapas (proporcionadas por el INEGI), fueron las plataformas SIG de ArcGIS 10.4 de ESRI y QGIS 2.8.

## 5. Resultados

### 5.1 Reestructuración económica y manifestación espacial en la Ciudad de México

Una vez que se lleva a cabo la notable desindustrialización en la CDMX y se pone en marcha el modelo de acumulación capitalista neoliberal (aproximadamente en 1982 en el país), por ende, trajo como consecuencias la terciarización de su estructura económica y el auge de los sectores comerciales, de servicios financieros, seguros, bienes inmuebles, restaurantes, hoteles, la mejora en comunicaciones —selectiva en ciertos espacios en la ciudad, destacando las tecnologías virtuales de información (TIC)—, transporte y corporativos. La Figura 2 pone de relieve la distribución, localización y especialización de actividades manufactureras, comerciales y de servicios en la CDMX en 2017 de Unidades Económicas (UE) a nivel AGEB.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Se utilizó la información de Unidades Económicas (UE) del Denué-INEGI al 2017 a nivel de Áreas Geoes-tadísticas Básicas Urbanas (AGEBS), que fungieron como unidades pequeñas de análisis. Este mapa consideró la especialización por AGEB para la CDMX —dos mil 408 AGEBS urbanas y un total de 456 mil 201 UE que representaron los sectores manufacturas, comercio y servicios— de acuerdo a la concentración de las UE por los tres sectores económicos dentro de cada AGEB. Se identificaron patrones de especialización



**Figura 2.** UE por sectores y especialización económica en CDMX, por AGEB, 2017.  
Fuente: elaboración propia con base en el Denue-INEGI, 2017.

Esta tendencia hacia la terciarización se explica por procesos de subcontratación de funciones complementarias o no sustantivas de las empresas. Lo que fueron departamentos de contabilidad, mercadotecnia, legal, etc., tienden a ser eliminados o reducidos para dar paso a la subcontratación de firmas especializadas en este tipo de servicios, lo que permite reducir costos de operación y aprovechar empresas especializadas en el servicio, conjunto de empresas que se clasifican como servicios al productor por ofrecer su servicio a otras firmas. Por ejemplo, en 2003 la CDMX registró una aglomeración muy alta de los servicios al productor que explicó el 76,4% del valor agregado nacional, correspondiendo al entonces DF una concentración del 75%. Desagregada ésta a nivel alcaldía (delegación), solo tres concentraron el 55,6% de ese valor agregado nacional, a saber, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Benito Juárez. Para 2014, la Zona Metropolitana (incluida CDMX como conjunto) registró una concentración del 30%, el DF (CDMX) 85,5%, siendo las alcaldías (delegaciones) Miguel Hidalgo (21,2), Cuauhtémoc (27,9) y Benito Juárez (13,2), las que concentraron una alta gama de servicios al productor con un 62,3% en conjunto (véase Tabla 1).

de servicios, comercio y mixto al centro, sur y poniente, en corredores urbanos; las manufacturas se localizaron en puntos muy acotados al norte, centro, sur y oriente. En todos los casos, las UE que rebasaban el 50 por ciento en el sector económico en el que fueron codificados se las clasificó como especialización predominante. A las UE que se las clasificó como de especialización mixta, presentaban más del 45 por ciento en el sector dominante, y más del 35 por ciento para el segundo sector.

**Tabla 1.** Servicios al productor y su valor agregado con respecto al porcentaje de la producción nacional en 2003 y 2014

	<i>Servicios</i>									
	<i>Al productor</i>		<i>Financieros y seguros</i>		<i>Inmobiliarios</i>		<i>Profesionales, científicos y técnicos</i>		<i>Dirección de corporativos y empresas</i>	
	2003	2014	2003	2014	2003	2014	2003	2014	2003	2014
<b>Cd. México**</b>	76.4	30.0	87.7	81.6	32.5	29.6	50.1	49.1	80.6	63.5
<b>Distrito Federal DF</b>	75.0	85.5	87.2	99.3	26.4	79.0	46.4	92.8	79.7	99.7
<b>Delegaciones</b>										
Benito Juárez	8.5	13.2	11.2	22.8	3.1	12.0	7.3	20.4	0.3	23.4
Cuauhtémoc	29.6	27.9	44.0	27.2	3.7	11.9	8.0	16.3	0.3	0.6
Miguel Hidalgo	17.5	21.2	8.9	12.7	7.3	29.9	18.5	41.4	66.2	43.1
Resto	44.4	37.6	35.9	37.2	85.9	46.2	66.2	21.8	33.2	32.9
% total DF	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

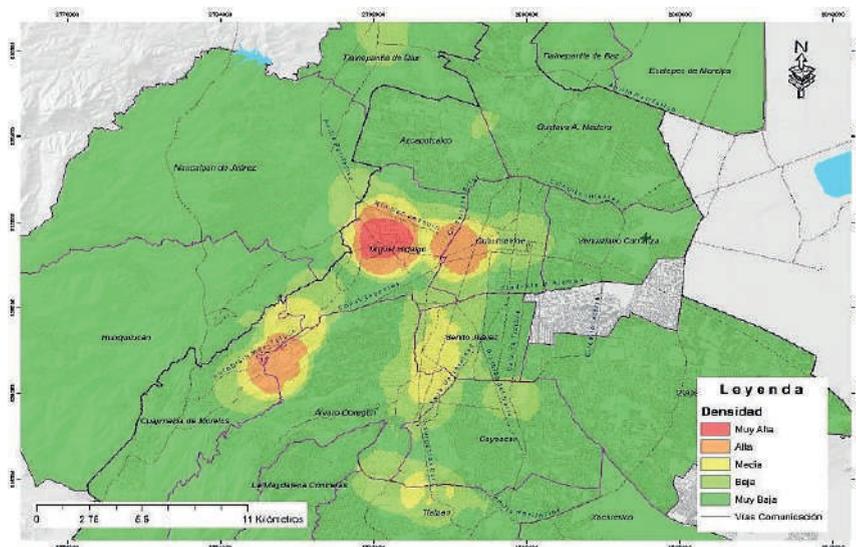
**Fuente:** elaboración propia con datos del Censo Económico de INEGI y Parnreiter, 2003.

\*\* Se considera a la CDMX como ZMCM para el cálculo de variables Servicios al Productor.

Asimismo, la concentración de las casas matrices de las 500 empresas más grandes registradas en México continúa siendo muy significativa. El número de empresas grandes que poseen sus principales sedes en la CDMX se ha mantenido por encima del 90% desde el reporte del año 2006. En 1993, 256 de las 500 empresas más grandes tenían sus sedes principales en la ciudad. Trece años más tarde totalizaron 352 —un aumento de 37 %—. Veintidós años después se registran 330, lo que favorece la concentración de casas matrices en un 93,6% en la CDMX (DF).

Esta situación permite recalcar que la CDMX es sede de las principales empresas matrices nacionales e internacionales. Tan solo de las 500 empresas más grandes en el país en 2015, 330 (66% del total nacional) se localizaron en la ciudad; 174 fueron nacionales (52,7%) y 156 extranjeras (47,3%). Por ende, esta concentración de empresas (Figura 3) aumenta la conexión de inmensos flujos de mercancías y personas en relación al territorio local, metropolitano, nacional e internacional.

La localización de los servicios avanzados de la ciudad se desarrolla hacia el poniente. Mientras que algunas alcaldías (delegaciones) centrales como Cuauhtémoc —centro histórico y una parte del Paseo de la Reforma—, y Azcapotzalco, al norte de la ciudad —de antaño industrial— van perdiendo importancia, Miguel Hidalgo, y en particular Álvaro Obregón y Cuajimalpa, al poniente de la ciudad, van atrayendo numerosas sedes de firmas. Ante estos hechos, del total de las 500 empresas en enero de 2018, 271 eran de propiedad mexicana (54,2%), y 229 de capital extranjero —Estados Unidos (97), Alemania (15), y España (15) como las de mayor número; destacando los sectores servicios financieros (10,2%), telecomunicaciones (7,6 %) y comercio exterior (7,2%)— (Expansión, 2018).



**Figura 3.** Concentración de las principales empresas en la CDMX, 2015.

Fuente: elaboración propia con información de CNN Expansion.

De acuerdo a este panorama, la incorporación de la CDMX, como bisagra entre la producción nacional y el mercado mundial, se debió por su rol atractor de actividades económicas que son necesarias para el funcionamiento de mercados globales, el consecuente aumento de su economía interna, sus funciones de control, gestión, concentración y articulación global de los servicios al productor (Sassen, 2001, en Parrreiter, 2011, p. 7). En las últimas dos décadas la estructura urbana de la CDMX se ha caracterizado por una estructura más policéntrica, por lo que es posible asumir una multiplicación de nuevos espacios de centralidad urbana, y varios de ellos se manifiestan tanto en subcentros como en corredores urbanos los cuales destacan por su edificación en altura y su especialización. Las nuevas necesidades de la producción exigen infraestructuras especializadas que respondan a los elevados niveles de competitividad requeridos por la economía globalizada. El Estado como agente económico que regula la actividad inmobiliaria a través de normas, que incide en el mercado y usos de suelo, invierte para viabilizar el capital acumulado, y crea espacios funcionales dentro de sus perímetros administrativos que, en conjunto con las acciones de empresas privadas del sector inmobiliario, van dando un nuevo sesgo metropolitano a la ciudad.

Los desarrollos corporativos han sido claves para la expansión del sector terciario, y generalmente implican cambios significativos en los usos y valores del suelo. Y pese a que la accesibilidad a ciertas localizaciones centrales sigue siendo muy importante, el alcance de estos nodos se ha ampliado; existe una difusión espacial de actividades que buscan localizaciones centrales, entre diferentes polos de desarrollo alternativos a pesar de mantener patrones de concentración.

## 5.2 Especialización de nuevos subcentros y corredores urbanos en altura

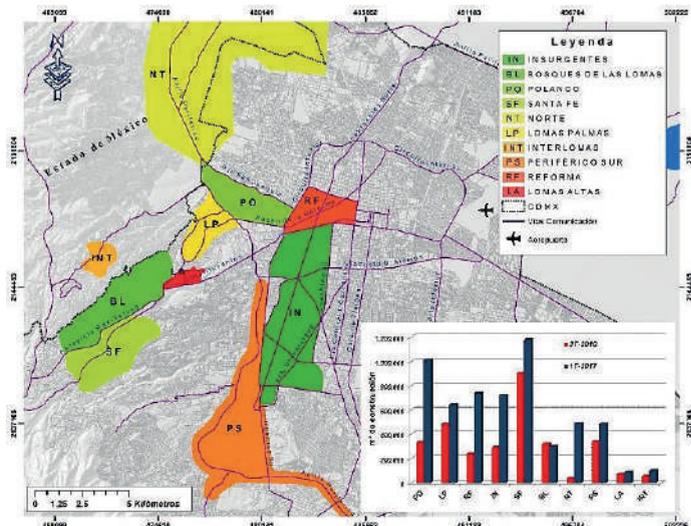
Desde que se firmó el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994, el auge inmobiliario de oficinas en la CDMX prácticamente inició. Las nuevas funciones de la CDMX como ciudad global permitieron el crecimiento de la demanda de espacio de oficinas para empresas transnacionales y mexicanas que operan a nivel internacional. A finales de 1999 se disponía de un inventario de oficinas ligeramente mayor a cuatro millones de m<sup>2</sup> (Cevallos, 2000). En este rubro, la consultora inmobiliaria internacional Colliers-Lomelin informaba que para satisfacer la demanda de espacio para oficinas corporativas, la actividad inmobiliaria se concentraba en siete principales submercados, mismos que se localizaban al poniente de la ciudad: Reforma, Polanco, Lomas, Bosques de las Lomas, Santa Fe, Periférico Sur e Insurgentes.

Entre 1997 y 2011 el inventario total del espacio de oficinas creció en 3,7 millones de m<sup>2</sup>. A mediados de 2012, el inventario total de oficinas corporativas en la CDMX fue de 6,5 millones de m<sup>2</sup>, incluyendo los tipos de oficinas A+, A y B. Los edificios de oficinas A+ son los más nuevos, lujosos, con avances tecnológicos en construcción y magnífica ubicación; los tipo A tienen entre 11 y 20 años; y los tipo B tienen entre 21 y 25 años. En términos de demanda y expansión, gran parte de la producción se concentró en los submercados de Reforma, Polanco e Insurgentes. Los precios promedio rondaron los US\$27/m<sup>2</sup>/mes en la mayor parte de la ciudad. La mayor disponibilidad de oficinas se concentraba en Reforma e Insurgentes, corredores históricos tradicionales, y se preveía una producción entre 2013 y 2014 de aproximadamente 400 mil m<sup>2</sup> (Jones Lang Lasalle, 2012, p. 22).

Durante 2013, la oferta inmobiliaria en el segmento de oficinas creció 4,5 %, lo que favoreció la incorporación de tres nuevos espacios para totalizar diez corredores: Interlomas, Lomas Altas (ambas al poniente de la ciudad) y norte (Periférico norte; véase la Figura 4). Al cierre del año la disponibilidad era del 11%, siendo la zona de Lomas Altas la más dinámica, al incrementar en 33% su oferta inmobiliaria, seguida de Periférico Sur, con 20%, Insurgentes, con 16,7% y Santa Fe, con 10%.

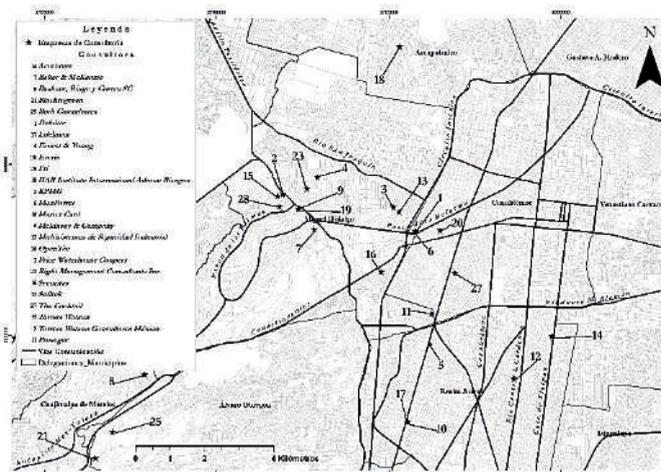
En el primer semestre de 2017, el sector de oficinas de clase A+ y A tuvo un inventario de 5,7 millones de m<sup>2</sup>. Distribuidos por número de edificios entre los diez corredores citados: Reforma con 21 (12,84 %); Polanco, 43 (17,57); Lomas, 64 (11,19); Bosques, 17 (5,21); Santa Fe, 75 (20,48); Periférico Sur, 33 (8,44); Insurgentes, 47 (12,52); Interlomas, 12 (1,74); Lomas Altas, 7 (1,49); y Norte, 25 (8,52; [avisonyoung.com](http://avisonyoung.com)). La gráfica al interior de la Figura 4 muestra que un poco más de la mitad de este tipo de oficinas se ubican en Santa Fe, Polanco y Paseo de la Reforma. Insurgentes y Lomas también se conciben como espacios para empresas integradas en los mercados globales.

La marcada concentración e incremento del sector financiero nacional en la CDMX revela que las antiguas plazas financieras de Reforma e Insurgentes (centro tradicional) son insuficientes, y la demanda de nuevos espacios se ha ido expandiendo hacia el poniente de la ciudad, ubicándose en corredores urbanos muy valorizados de arquitectura vanguardista; con buena conectividad, así como infraestructura, servicios y otras funciones que genera la aglomeración (Vázquez y Fuentes, 2015, p. 102).



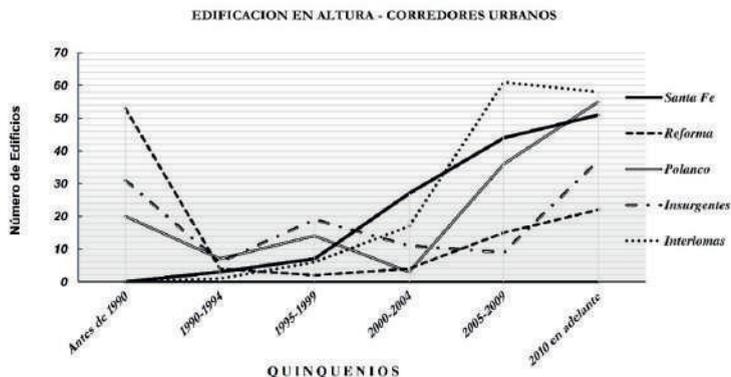
**Figura 4.** Mercado de oficinas A+, A por corredor urbano (m<sup>2</sup>), CDMX, 3T-2010 y 1T-2017. Fuente: Elaboración propia con base en CB Richard Ellis y Avison Young.

De esta forma, la CDMX acoge las oficinas de las grandes empresas transnacionales de consultoría entre las que se destacan Deloitte & Touche, KPMG, Price Waterhouse Coopers, Accenture (antes Andersen Consulting) y Ernst & Young (grupo conocido como Big Five). Sobresalen otras empresas que asesoran inversionistas, desarrolladores inmobiliarios y servicios financieros como Cushman & Wakefield, Softec, Colliers International, Lang LaSalle, y CBRE (remítase a la Figura 5).



**Figura 5.** Localización de las principales empresas de consultoría en CDMX, 2015. Fuente: elaboración propia, plataforma 2D ArcGIS, 10.4.

Particularizando sobre la dinámica temporal de los corredores en altura y las nuevas centralidades, su estructura y uso de suelo, en primer lugar existe un desplazamiento de los ejes de verticalización corporativa de zonas centrales hacia el poniente de la ciudad, que posee mejor infraestructura, servicios y equipamiento urbano, así como mejores condiciones ambientales y suelos más estables geológicamente hablando. Los datos recabados y su posterior georreferenciación dentro de las herramientas SIG muestran cómo la construcción de edificios altos en estos corredores ha tenido marcados periodos de auge (Figura 6). A mediados de los años 1990 se aprecia un importante incremento en el número de edificios, sobre todo en el corredor Insurgentes y el corredor Santa Fe; otro periodo de auge es más marcado, porque en algunos corredores se produce un boom de edificios en altura, como es el caso de, nuevamente, el de Santa Fe y el de Interlomas, y posteriormente Polanco. A grandes rasgos, antes de los años 1990, los primeros y tradicionales ejes de la verticalización eran Reforma en la zona central, e Insurgentes con el mayor número de edificios altos; veinte años después se lleva a cabo una reactivación importante y los nuevos ejes de la verticalización se desplazan al poniente de la ciudad con Interlomas y Santa Fe, y Polanco en la parte más central, complementando en gran medida a los ejes anteriores que aún se mantienen activos.



**Figura 6.** Construcción de edificios altos por corredores urbanos en CDMX, 1990-2010.

**Fuente:** Elaboración propia con base en emporis.com y edemx.com

En cuanto a la especialización de los ejes de la verticalización como nuevas centralidades, los usos de suelo residenciales y de oficinas corporativas son los predominantes en la construcción en altura en la gran mayoría de ellos (véase la Tabla 2). En los corredores, estos dos usos representan más del 80%; sin embargo, una excepción es el corredor Reforma que en segundo lugar posee el uso de hoteles, condición que resalta por su localización central. De vivienda residencial de altos ingresos a uno de los principales ejes articuladores lineales de la metropolización hacia el poniente de la ciudad, Paseo de la Reforma se terciariza e incrementa el uso intensivo del suelo (Figura 7). A partir del Centro Histórico, esta centralidad ampliada conecta áreas corporativas y residenciales de sectores de altos ingresos como

Santa Fe (véase figura 8), Lomas de Chapultepec y Polanco (Figura 9), por lo que la morfología, el simbolismo y apropiación clasista del paseo es notoria.

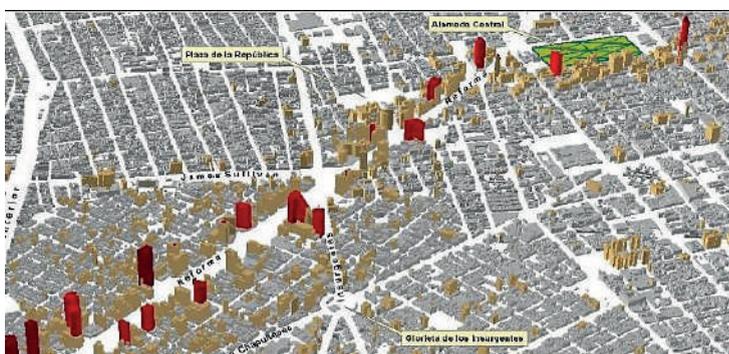
**Tabla 2. Usos de suelo por corredores urbanos**

Corredor Urbano	Distribución de Edificios y Principales Giros								Total
	Comercio	Educativo	Hospital	Hotel	Oficinas	Residencial	Mixto*	Otros**	
Polanco (PO)	1	—	—	6	61	115	14	1	198
Lomas Palmas (LP)	—	—	—	1	17	15	2	—	35
Reforma (RF)	—	—	—	34	75	23	10	2	144
Insurgentes (IN)	—	1	2	1	76	81	17	—	178
Santa Fe (SF)	—	—	—	6	32	82	12	—	132
Bosques de las Lomas (BL)	—	—	—	—	19	83	4	—	106
Periférico Norte (NT)	—	—	—	—	3	5	6	—	14
Periférico Sur (PS)	—	1	4	4	34	61	4	—	108
Lomas Altas (LA)	—	—	—	—	2	—	—	—	2
Interlomas - Huixquilucan (INT)	—	—	—	—	2	164	3	—	169
Otros	—	1	5	—	24	83	5	1	119

Muestra de Edificios = 1205

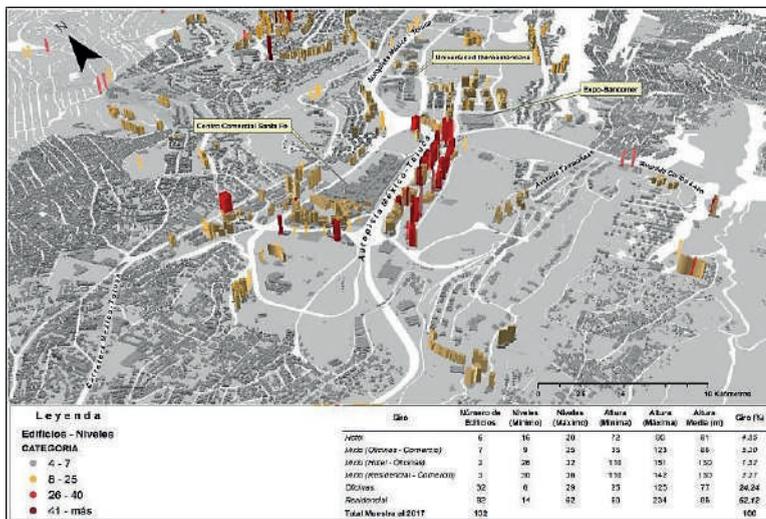
**Fuente:** elaboración propia con datos de CBRE.com.mx, Avison Young Mexico-City, y emporis.com.

Los corredores muestran cierta especialización según uso de suelo y altura. En Polanco, Insurgentes e Interlomas-Huixquilucan se presentan la mayor densidad de edificios respectivamente (198, 168 y 169); Reforma y Santa Fe les siguen en importancia (144 y 132). Sin embargo, el corredor Reforma contiene el mayor número de edificios mayores a 200 m; este corredor se ha vuelto emblemático a lo largo de la principal avenida de la zona central. En cuanto al uso de suelo, Interlomas-Huixquilucan y Santa Fe están claramente especializados en uso residencial (97 y 62% respectivamente). En el otro extremo, el corredor Reforma, que solo dedica el 16% al uso residencial, está más especializado en usos de suelo terciario como oficinas y hoteles. Es de destacar que otros usos como los comerciales, financieros u hospitales, no son tan frecuentes en la construcción en altura, ni aun mezclados con otros usos.

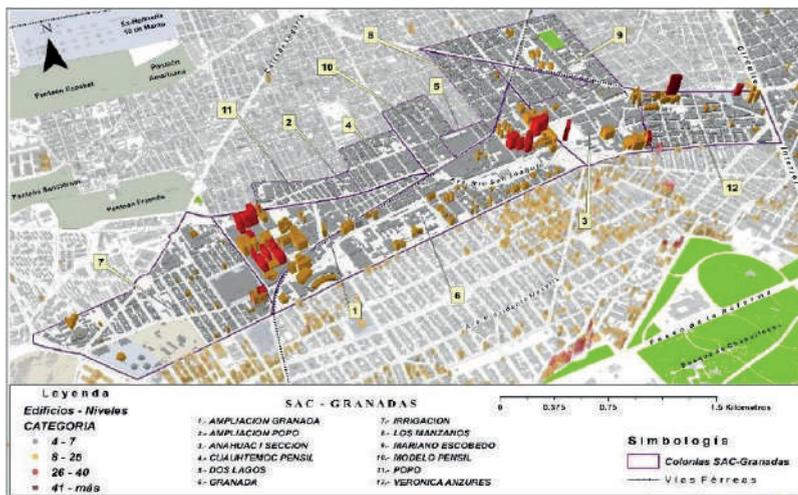


**Figura 7.** Corredor urbano en altura, Paseo de la Reforma-Alameda.

Fuente: elaboración propia, plataforma 3D ArcGIS 10.4.

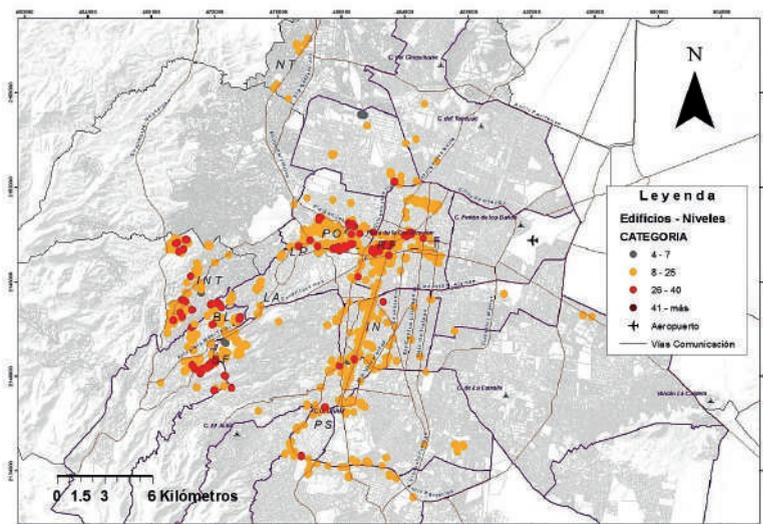


**Figura 8.** Corredor urbano en altura, Santa Fe.  
 Fuente: Elaboración propia, plataforma 3D ArcGIS 10.4.



**Figura 9.** Corredor urbano en altura, Polanco-Nuevo Polanco (las Granadas).  
 Fuente: elaboración propia, plataforma 3D ArcGIS 10.4.

Actualmente, Santa Fe, Reforma, Polanco y otros corredores urbanos en altura, como nuevas centralidades, aparecen como ámbitos de la reproducción urbana de la CDMX en la mundialización neoliberal. Su materialización y gestión es posible gracias a la combinación de capitales inmobiliarios y financieros nacionales e internacionales (véase Figura 10).



**Figura 10.** Distribución de edificios por niveles y giros por corredor urbano.

Fuente: elaboración propia con información de skyscrapercity, empo-ris.com y edemx.com.

En este orden de ideas, si se habla de la CDMX como ciudad global se habla, por ende, de algunas zonas bien delimitables espacialmente (Parnreiter, 2016, p. 156). En consecuencia, es importante destacar que esta geografía de la accesibilidad condiciona las estrategias de localización —o de relocalización— de las funciones urbanas. De esta forma, la actual política urbana neoliberal concede a las empresas constructoras ser artífices de la actividad productiva para el funcionamiento del mercado inmobiliario de oficinas, así como el residencial y mixto en altura. El rol que protagoniza el Estado, por tanto, consiste en garantizar un ambiente urbano óptimo para el desenvolvimiento de las empresas privadas.

## 6. Consideraciones finales

Desde un enfoque teórico, técnico de análisis espacial y de visualización en un Sistema de Información Geográfico (SIG), esta reconfiguración de espacios por la que atraviesa la CDMX fue representada visualmente gracias a la implementación de herramientas de geotecnología como Google Earth. Con sus potencialidades y limitantes, Google Earth fue un instrumento técnico de gran importancia para este estudio al facilitar la creación y tratamiento de datos georreferenciados que permitieron la exploración, el análisis, la comprensión y la comunicación de información dentro de un espacio virtual. Los aspectos relacionados con la localización y la extensión espacial de los datos gestionados a partir de esta plataforma web cobraron relevancia al combinarse con herramientas de geoprocésamiento en SIG. Como atributos básicos de la base de datos de los edificios, se destacaron la fecha de realización (proceso),

número de niveles, alturas en metros, giros económicos y usos de suelo (especialización); la ubicación geográfica fue primordial para georreferenciar y evaluar la localización de cada edificio.

Con las herramientas de geoprocésamiento en SIG fue posible dibujar el comportamiento espacial, la dinámica y la ubicación geográfica de los edificios, incluso los más icónicos (altos); esta evolución espacial presenta patrones longitudinales de especialización y mezcla de actividades económicas de localización que facilitan la interpretación de la interrelación entre los diferentes subcentros y nodos urbanos que la integran. Este tipo de geotecnologías amplían las posibilidades de obtener resultados asociados a la transformación urbana y su modelización por cambios de usos de suelo incorporados a la escala de la producción inmobiliaria en altura.

Los resultados a partir de los mapas y la cartografía generada exponen la tendencia del alcance urbano de subcentros y corredores especializados, sobre todo los de corte corporativo y residencial, como imagen del proceso de estructuración urbana de la CDMX en las últimas décadas. Esta evolución espacial reciente en la ciudad evidencia la dinámica de la ocupación del suelo urbano mediante la incorporación del edificio en altura. La dimensión temporal del proceso de verticalización en la CDMX revela, en términos espaciales, la estructura policéntrica que representa un fuerte sesgo hacia el desarrollo de zonas residenciales de élite, principalmente hacia el poniente y sur de la ciudad, mismas que son áreas con mejor infraestructura y grupos con mayor poder económico en la ciudad.

La centralidad pierde relevancia en favor de una mayor flexibilidad en los patrones de localización, como consecuencia de la incorporación de negocios internacionales, el desarrollo de sistemas de transporte y telecomunicaciones, inversión pública y privada, empresas innovadoras, suburbanización de servicios y una distribución policéntrica de los polos de empleo. Así muchas empresas se han trasladado, total o parcialmente, a municipios (alcaldías, delegaciones) metropolitanos suburbanos, donde aprovechan espacios adicionales de alta calidad a precios/rentas asequibles (Rebelo, 2011, p. 85).

Como consecuencia de la aceleración del modelo de crecimiento urbano en las ciudades latinoamericanas, como la CDMX, se tiene una competencia entre sus territorios para atraer capitales. Además de acentuar las desigualdades sociales y la fragmentación territorial, las condiciones de competitividad de los mercados financieros y comerciales reconfiguran sectores urbanos en plazos cada vez más breves. Se comienzan a materializar cambios económicos, sociales y tecnológicos que dan lugar a una reconfiguración de los espacios urbanos asignando a la iniciativa privada y a los desarrolladores o promotores inmobiliarios un protagonismo inusitado.

## **Bibliografía**

- Borsdorf, A. (2003). La segregación socioespacial en ciudades latinoamericanas: el fenómeno, los motivos y las consecuencias para un modelo del desarrollo urbano en América Latina, en José Luis Luzón, Christoph Stadel y César Borges

- (coords.). *Transformaciones regionales y urbanas en Europa y América Latina*. Barcelona, Universidad de Barcelona.
- Cevallos, M.G. (2000). Un Mercado con mucho Movimiento. *Revista Digital Obras Web*.
- Coulomb Bosc, R. (2012). El centro de la Ciudad de México frente al desafío de un desarrollo urbano más sustentable (elementos para el proyecto de investigación Hábitat y Centralidad). *Hábitat y centralidad en México. Un desafío sustentable*, Coulomb, René; Esquivel, Teresa y Gabriela Ponce (Coords.), Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, 17-57.
- Cruz, F., & G. Garza (2014). Configuración microespacial de la industria en la Ciudad de México a inicios del siglo XXI. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 29(85), 9-52. <https://doi.org/10.24201/edu.v29i1.1454>
- Fedele, J., & I. Martínez. (2015). Verticalización y desarrollo inmobiliario del núcleo urbano central de Santa Fe: Cambios morfológicos, conflictos urbanos y regulaciones edilicias en la recuperación poscrisis 2001. *Cuaderno Urbano, Espacio, Cultura, Sociedad*, 18(18), 65-88. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=369239304004>
- Ford, L. R. (1996). A new and improved model of Latin America City Structure. *Geographical Review*, 86(3), 437-440. <https://doi.org/10.2307/215506>
- Glaeser, E. (2011). *El Triunfo de las Ciudades*. Madrid: Taurus.
- Griffin, E. & L. Ford. (1980). A model of Latin American City Structure. *Geographical Review*, 70(4), 397-422. <https://doi.org/10.2307/214076>
- Herce Vallejo, M. (2013). *El negocio del territorio. Evolución y perspectivas de la ciudad moderna*. Barcelona: Alianza.
- Hewitt, L. & S. Graham. (2015). Vertical cities: Representations of urban verticality in 20th-century science fiction literature, *Urban Studies*, 52(5), 923-937. <https://doi.org/10.1177/0042098014529345>
- Janoschka, M. (2004). El modelo de ciudad latinoamericana. Privatización y fragmentación del espacio urbano de Buenos Aires: el caso Nordelta, Velch, M. (Ed.), *La ciudad en cuestión. Nuevos Lugares, viejos espacios*. Buenos Aires: Biblos, 80-117.
- Macedo, S. S. (1991). O processo de verticalização e a paisagem da cidade. *Revista Sinopse*, 15, 68-76.
- Mendes, C. Miranda (2009). Aspectos culturais do consumo e da mercantilização do processo de verticalização do eixo Maringá, Londrina, Arapongas e Apucarana (PR) Brasil. In: Mendes, C. M.; Tows, R. L. (Orgs.) *A geografia da verticalização em algumas cidades médias no Brasil*. Maringá: EDUEM, 15-32.
- Pacione, M. (2005). *Urban geography. A global perspective* (2nd. Ed.). Londres: Routledge.
- Paris, M. (2013). De los centros urbanos consolidados a los lugares de centralidad: una propuesta metodológica para su estudio. *Ciudades*, 16(1), 47-69.
- Parnreiter, C. (2011). Formación de la ciudad global, economía inmobiliaria y transnacionalización de espacios urbanos. El caso de ciudad de México. *Eure*, 37(111), 5-24. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612011000200001>
- Parnreiter, C. (2016). La producción de los espacios de la ciudad global: planificación estratégica, megaproyectos y las "necesidades" de mercado inmobiliario. *Revista de Geografía Norte Grande*, 64, 151-166. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000200010>
- Pradilla Cobos, E. (2011). Zona Metropolitana del Valle de México: una ciudad baja, dispersa, porosa y de poca densidad. En E. Pradilla C. (Comp.), *Ciudades compactas, dispersas, fragmentadas*.

- Pradilla Cobos, E. (2015). De la ciudad compacta a la periferia dispersa. *Ciudades*, 106, 2-9.
- Ramires, J. C. de Lima (1998). *A verticalização do espaço urbano de Uberlândia: uma análise da produção e do consumo da habitação*. [Tese Doutorado em Geografia, São Paulo] Universidade Sao Paulo (USP).
- Rebello, E. M. (2011). Urban planning in office markets: A methodological approach. *Land Use Policy*, 28, 83-95.
- Rojas Quezada, C. A., Muñiz Olivera, I. y García López, M. A. (2009). Estructura urbana y policentrismo en el Área Metropolitana de Concepción. *EURE*, 35(105), 47-70. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612009000200003>
- Stevens Vázquez, G. S. (2012). La vulnerabilidad hídrica en la ciudad de San Luis Potosí. Un análisis espacial. *Revista Nueva Época*, 2(4), 130-159. <https://doi.org/10.21696/rcsl042012530>
- Souza, M. A. Aparecida de. (1994). *A identidade da metrópole: a verticalização em São Paulo*. São Paulo: Hucitec.
- Töws, R. L. & C. Miranda Mendes (2011). O estudo da verticalização urbana como objeto da geografia: enfoques e perspectivas metodológicas. I Simpósio de Estudos Urbanos: Desenvolvimento Regional e Dinâmica Ambiental. 29 a 31 de agosto.
- Vázquez, A., & L. Fuentes (2015) ¿Una nueva geografía corporativa en Santiago de Chile? *Bitácora*, 25(1), 99-109. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v1n25.42438>

## Hemerográficas

*Expansión*. Ranking 2018: Las empresas más importantes de México. Revista Expansión, agosto de 2018. <https://expansion.mx/empresas/2018/08/03/ranking-2018-las-empresas-mas-importantes-de-mexico>

JLL-Jones Lang LaSalle (2012). Latin America Overview Prime Office Market Q4. 33 p.

## Páginas institucionales

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). <https://www.inegi.org.mx/servicios/datosabiertos.html>

# A Cartografia Histórica de Petrópolis e uma análise geográfica sincrônica para o século XIX (1846-1861)a

The Historical Cartography of Petrópolis and a Synchronic Geographic Analysis for the 19th Century (1846-1861)

Tainá Laeta<sup>1</sup>

Manoel do Couto Fernandes<sup>2</sup>

Mário Gonçalves Fernandes<sup>3</sup>

*Recebido 9 de agosto de 2022; aceito 2 de novembro de 2022*

## RESUMO

A cidade de Petrópolis possui uma trajetória diferenciada em relação as outras cidades brasileiras, pois a conjuntura econômica, política e social sincrônica dão a cidade um caráter singular em sua criação. A compra da fazenda do Córrego Seco realizada em 1830 por Dom Pedro I é a primeira medida para concretização da construção do palácio imperial e a criação de uma povoação denominada Petrópolis. Para o estudo da geografia do passado da cidade imperial de Petrópolis, realizou-se busca por documentos históricos normativos e cartográficos junto as instituições de memória. Nesse sentido, destacam-se três documentos históricos, sendo eles dois normativos: Decreto Imperial nº 155 de 1843, marco de criação da cidade e o último documento, o relatório provincial de 1846, que especifica a distribuição dos prazos imperiais de acordo com o uso da terra e status ocupacional dos foreiros. Quanto ao documento histórico cartográfico, salienta-se a *Planta Koeler* de 1846, documento norteador desta pesquisa de autoria de Julio Koeler. Além desta, foram analisadas outras quatro plantas históricas, que foram georreferenciadas a partir da base cartográfica na escala 1:10.000 adquirida na Prefeitura Municipal de Petrópolis.

<sup>1</sup> Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil, e-mail: [tainalaeta@gmail.com](mailto:tainalaeta@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1607-5640>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: [manoel.fernandes@igeo.ufrj.br](mailto:manoel.fernandes@igeo.ufrj.br). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4500-0624>

<sup>3</sup> Universidade do Porto, Portugal, e-mail: [mgfernan@letras.up.pt](mailto:mgfernan@letras.up.pt). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9684-2170>

O georreferenciamento possibilitou a sobreposição dos limites das cinco plantas históricas e junto aos documentos históricos normativos analisar mudanças ocorridas nos limites dessa nova urbe, através da vetorização dos quarteirões e prazos imperiais, além de outras feições constantes nas plantas históricas. Desse modo, com intervalo de quinze anos desde o primeira planta histórica até a última analisada, juntamente aos documentos históricos normativos constatou-se grande expansão dos limites inicialmente traçados na *Planta Koeler*. Desta maneira, as imposições dispostas nos documentos normativos traduzem em Petrópolis uma estratificação social e segregação espacial de padrão espacial característico do século XIX, com a elite instalada junto ao centro, pois era no centro da cidade que se encontravam as mais importantes instituições urbanas.

Palavras-chave: *Cartografia Histórica, Geografia Histórica; Petrópolis/RJ, Planta Koeler, Morfologia Urbana.*

## ABSTRACT

The city of Petrópolis has a differentiated trajectory in relation to other Brazilian cities, because the synchronic economic, political and social conjuncture gives the city a unique character in its creation. The purchase of the *Córrego Seco* farm in 1830 by Dom Pedro I is the first measure to carry out the construction of the imperial palace and the creation of a village called Petrópolis. For the study of the geography of the past of the imperial city of Petrópolis, a search was carried out for normative and cartographic historical documents along with memory institutions. In this sense, three historical documents stand out, two of them normative: Imperial Decree nº 155 of 1843, landmark of creation of the city and the last document, the provincial report of 1846, which specifies the distribution of imperial deadlines according to the use of the land and occupational status of tenants. As for the historic cartographic document, the *Koeler Plan* of 1846 stands out, the guiding document of this research authored by Julio Koeler. In addition to this, four other historical plans were analyzed, which were georeferenced from the cartographic base on a scale of 1: 10,000 acquired from the City Hall of Petrópolis. The georeferencing made it possible to overlap the limits of the five historical plans and together with the normative historical documents to analyze changes that occurred in the limits of this new city, through the vectorization of blocks and imperial terms, in addition to other constant features in the historical plans. Thus, with an interval of fifteen years from the first historical plan to the last one analyzed, together with the normative historical documents, a great expansion of the limits initially drawn in the *Koeler Plan* was verified. In this way, the impositions laid out in the normative documents translate in Petrópolis a social stratification and spatial segregation of a spatial pattern characteristic of the 19th century, with the elite installed close to the center, as it was in the center of the city that the most important urban institutions were located.

Key words: *Historical Cartography, Historical Geography, Petrópolis/RJ, Koeler Plant, Urban Morphology.*

## 1. Introdução

Os municípios da região Serrana do atual estado do Rio de Janeiro em sua história contada e assim no imaginário criado, trazem associado ao processo de ocupação que uma das motivações para a instalação de famílias nessas regiões era a busca por um clima mais ameno que o da capital. Porém, é certo que essa não terá sido a principal razão, pois a motivação, mudança, desbravamento, busca por novos lugares está diretamente relacionada a questão econômica e política vigente ao momento.

Entre os diversos municípios localizados nas montanhas/serras fluminenses está a cidade de Petrópolis, que teve uma trajetória particular quando comparada não só com as cidades fluminenses, mas também em relação à maioria dos municípios brasileiros.

Historicamente, as cidades brasileiras surgiram como vila. Porém, segundo Oliveira Junior (1926, p. 310), até o ano de 1846 Petrópolis era apenas um curato e através da lei nº 397, de 20 de maio de 1846 foi elevado à categoria de freguesia, sob a denominação de São Pedro de Alcantara, compondo parte do município da Estrella, tornando-se município, sob a lei nº 961, de 29 de setembro de 1857.

Essa rápida ascensão na esfera administrativa tinha uma razão de ser: Petrópolis era a cidade onde Dom Pedro II, o Chefe de Estado brasileiro, passou a morar a partir do final da década de 1840. Em pouco tempo, todos os “grandes” da Corte, fossem políticos ou negociantes, tinham suas casas naquela nova urbe, pois ali estava o “centro do poder”.

Em razão desses fatores/aspectos, Petrópolis começou a crescer, e seu desenvolvimento foi representado cartograficamente, com uma frequência pouco encontrada em outras cidades ou vilas brasileiras.

Além dessa particularidade, há outras, por vezes pouco lembradas.

A “cidade de Pedro” fora planeada não em terras públicas ou doadas para esse fim, mas dentro de uma propriedade que pertencia ao próprio monarca, e que foi particionada de uma forma bastante específica para a época, sendo inclusive estabelecido previamente as disposições dos quarteirões e como e por quem seriam ocupados.

A cidade de Petrópolis em sua divisão político-administrativa pensada por Julio Frederico Koeler, possui a particularidade de ser dividida inicialmente em onze quarteirões e duas vilas imperiais, onde estes quarteirões e vilas se assemelham a atual divisão político-administrativa em bairros, e já os prazos imperiais correspondem aos terrenos.

A Companhia Imobiliária de Petrópolis originária da Superintendência da Fazenda Imperial ainda mantém o direito legal a cobrança de foro sobre os prazos (terrenos), mesmos os parcelados posteriormente, tendo inclusive preferência de compra em uma eventual alienação dessas terras usufruídas em regime de enfiteuse, com um recolhimento de 2,5% a título de laudêmio no valor de alienação desses imóveis localizados no primeiro distrito do município (Ambrozio, 2012, p. 1-7). Esta Companhia é considerada a entidade jurídica que mantém o controle de cobrança sobre as propriedades na qual a cidade se originou.

A enfitêuse é compreendida como sendo um instituto do Direito Civil e também o mais amplo dos direitos reais. Aos enfitêutas é dado o direito do domínio útil ou também conhecido como domínio limitado, dando o direito de desfrutar de todas as qualidades da coisa, sem destruir a sua substância.

Entretanto, isso, mediante a uma das duas imposições colocadas aos foreiros, que é pagar ao senhorio uma prestação anual invariável denominada foro; a segunda obrigação é a de dar ao proprietário o direito de preferência, toda vez que for alienar o prazo (terreno). Salvo o caso do senhorio não demonstrar preferência de alienação, este terá o direito ao *laudêmio*, que se traduz na porcentagem de 2,5% sobre o negócio realizado.

Um dos fatores que delimitam a criação da cidade são os seus cursos d'água. Os rios da cidade de Petrópolis têm por característica serem de pequeno porte e não sendo de uso para navegação fluvial. Entretanto, os mesmos rios dão a cidade um caráter delineador no processo de ocupação, visto que foi a partir de seus vales que Koeler estabeleceu a área inicial de instalação do núcleo urbano.

Tanto assim, que os primeiros onze quarteirões imperiais e suas duas vilas imperiais foram delimitados ao longo de três principais cursos d'água, a saber são eles: rio Piabanha como principal curso d'água, contando ainda com o rio Quitandinha e o rio Palatino (antigo Córrego Seco) (Lordeiro, 2005, p.23).

## 2. Área de estudo

O município de Petrópolis encontra-se localizado na região Serrana do estado do Rio de Janeiro, ao norte na região Metropolitana da cidade do Rio de Janeiro (RMRJ), entre as coordenadas 43°22' e 43°00' a oeste e 22°34' e 22°12' ao sul.

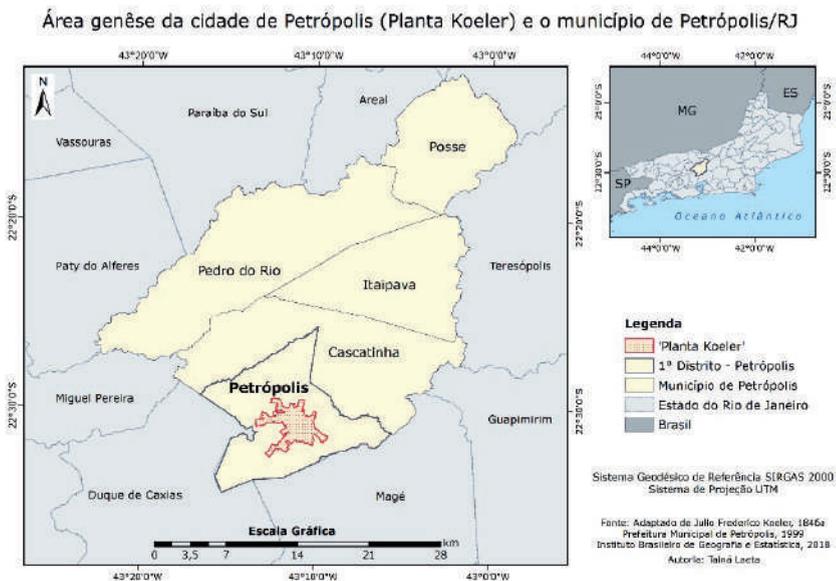
O município conta com uma área de 795.769 km<sup>2</sup>, uma população de 295.917 habitantes para o ano de 2010, e com população estimada de 306.191 habitantes para o ano de 2019, segundo o Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2011, p. 84; <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/petropolis/panorama>).

Inicialmente Petrópolis passa a categoria de município a partir da Lei n° 961, de 29 de setembro de 1857 (Brasil, 1857). E em conjunto com decretos estaduais são criados os distritos de: Petrópolis, Cascatinha, Itaipava, Pedro do Rio e São José do Rio Preto. Destaca-se que em 17 de junho de 1859 foi instalada a primeira Câmara Municipal e eleito seu primeiro presidente, o Comendador Albino José de Siqueira (Fróes, 2002, p. 9).

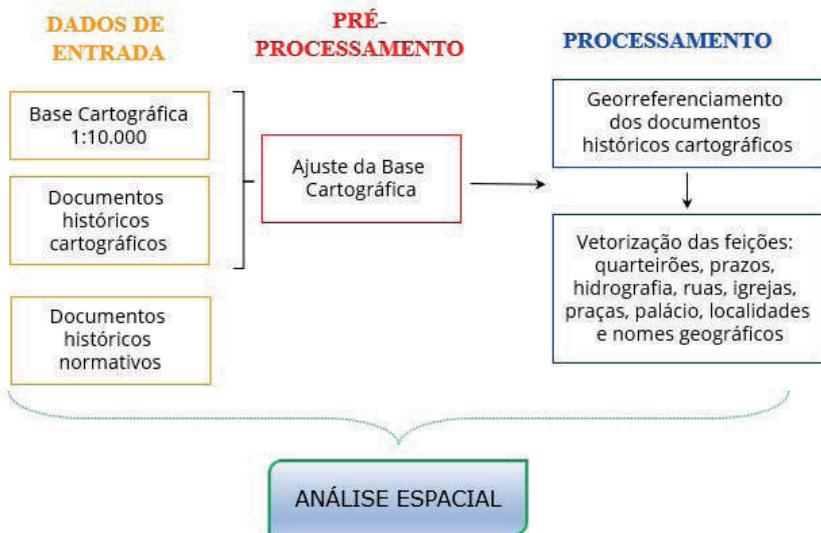
A área gênese traçada por Koeler é de 15,62 km<sup>2</sup>, correspondendo a 11,75% da área do 1° distrito de Petrópolis e 1,96% da área total do município (Figura 1).

## 2. Roteiro metodológico

Para elaboração da pesquisa, primeiramente realizou-se concomitantemente o levantamento de documentos históricos cartográficos e histórico documental, sejam normativos, através de decretos e leis, como também publicações em jornais e artigos da época (Figura 2). Seguidamente foi realizado o georreferenciamento dos documentos históricos cartográficos e realizada a vetorização das feições contidas nos referidos documentos.



**Figura 1.** Mapa de localização do município de Petrópolis.  
Fonte: elaboração própria.



**Figura 2.** Fluxograma do roteiro metodológico.  
Fonte: elaboração própria.

## 2.1 Levantamento dos documentos históricos cartográficos

Nesta fase realizou-se o levantamento de documentos históricos cartográficos referentes a área gênese da imperial cidade de Petrópolis no século XIX. Foram descobertos cinco documentos históricos cartográficos, que foram elaborados em um intervalo temporal de 15 anos (1846-1861).

O primeiro documento cartográfico, *Planta de Petropolis - 1846*, também conhecida como Planta Koeler, de autoria de Julio Frederico Koeler, foi adquirido na Companhia Imobiliária de Petrópolis a partir de fotografias, tanto em tomada total (Figura 3) como de um conjunto de 191 fotos.

Os documentos cartográficos seguintes são: *Planta de Petropolis - 1846*, também de autoria de Julio Frederico Koeler, *Planta de Petropolis - 1850* de autoria desconhecida e a *Planta da Imperial Colonia de Petropolis (reduzida para guia dos visitantes) - 1854* assinado por Otto Reimarus. Os três documentos encontram-se sob os cuidados da Biblioteca Nacional e podem ser consultados em seu sítio eletrônico (<http://bndigital.bn.gov.br/acervodigital/>).



**Figura 3.** Planta de Petropolis - 1846, elaborada por Julio Frederico Koeler, com dimensões de 129,2 centímetros de altura por 128,9 centímetros de largura. Fonte: Companhia Imobiliária de Petrópolis e Acervo do Laboratório de Cartografia - GeoCart/UFRJ.

O último documento cartográfico pesquisado é planta da *Imperial Cidade de Petrópolis e os quarteirões coloniaes (planta reduzida) – 1861*, de autoria de Carlos Augusto Taunay, obtida no Arquivo Histórico do Museu Imperial (Ibram/MinC/ nº29/2017).

## 2.2 Levantamento histórico documental

Concomitante ao levantamento dos documentos históricos cartográficos, também realizou-se o levantamento de documentos históricos normativos referentes a fundação da cidade de Petrópolis, para uma melhor compreensão do processo de ocupação.

O primeiro documento é a Escritura de Venda de huma Fazenda de cultura, e suas benfeitorias, plantas e cazas, e todos os seus pertences, que a Sua Magestade Imperial fazem Jose Vieira Affonso, e sua mulher e quitação, como abaixo se declara, que se encontra sob guarda do Arquivo Público Nacional (AN). Será sob as terras desta fazenda que se assentará a maior parte do núcleo inicial da povoação da futura Petrópolis.

O segundo documento que se conseguiu acesso foi o *Decreto Imperial nº 155*, também conhecido como “Plano-Povoação Palácio de Verão”, assinado por Sua Magestade Imperial Dom Pedro II e por seu Mordomo da Casa Imperial, Paulo Barbosa. É este documento que marca a fundação e o início do processo de ocupação da cidade de Petrópolis, estando sob os cuidados do Arquivo Público Nacional (AN).

Os três documentos seguintes são caracterizados por um conjunto de normas, isto é, condições com que as terras da futura Petrópolis deverão ser arrendadas. Estes documentos foram obtidos a partir das publicações da Comissão do Centenário de Petrópolis, em comemoração ao centenário da cidade no ano de 1943.

Posterior a este conjunto de três documentos, há o Relatório do presidente da Província do Rio de Janeiro, o senador Aureliano de Sousa e Oliveira Coutinho, na abertura da Assembléa Legislativa Provincial no 1º de março de 1846, acompanhado do orçamento da receita e despesa para o ano financeiro de 1846 a 1847.

O relatório autoriza a contratação de colonos estrangeiros para as obras do núcleo de povoação da futura Petrópolis e estabelece as regras para a distribuição dos prazos imperiais aos colonos, considerando a proximidade do Palácio Imperial, tipo de uso/atividade a ser desenvolvida e as dimensões dos prazos.

## 2.3 Georreferenciamento das plantas históricas

O crescente uso das geotecnologias em mapas históricos, através do georreferenciamento permite que haja uma compatibilização, ou melhor, sobreposição das plantas históricas e a base cartográfica, proporcionando uma melhor análise nas mudanças ocorridas no espaço geográfico em momentos distintos.

A base cartográfica utilizada foi obtida junto a Prefeitura Municipal de Petrópolis (PMP) – Coordenadoria de Planejamento e Gestão Estratégica ou Secretaria de Planejamento e Urbanismo na escala 1:10.000 e levantada no ano de 1999. A mesma se encontrava na projeção Universal Transversa de Mercator – UTM e no sistema geodésico SAD69 (*South American Datum 1969*), fuso 23. Posteriormente, na plataforma ArcGIS 10.1 os dados foram reprojetados para o sistema geodésico SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) (Figura 4).

Vale destacar que, os dados de mapeamento para essa escala contemplaram a totalidade da área das plantas históricas pesquisadas.



**Figura 4.** Distribuição dos 30 pontos de controle utilizados no processo de georreferenciamento da *Planta de Petrópolis – 1846*.

Fonte: Laeta (2021).

Seguido ao processo de georreferenciamento dos cinco documentos históricos cartográficos estudados, foi realizada a vetorização e extração das informações contidas nas mesmas, isto é, tanto no que tange as informações de cunho cartográfico, quanto informações sobre quem foi seu elaborador, onde foi reproduzido (impresso) o documento.

Nesse sentido, é importante destacar das informações extraídas, aqueles referentes a demarcação/limite dos quarteirões e prazos imperiais, extensão frontal e lateral destes prazos (terrenos), pois será de grande contribuição para entender a organização espacial e estratificação social no bojo do nascimento da imperial cidade de Petrópolis.

### 3. Resultados

Após o processo de georreferenciamento das plantas históricas da imperial cidade de Petrópolis e extração de suas feições geográficas, observou-se que no

intervalo de quinze anos na elaboração dos documentos históricos cartográficos houve uma expansão significativa da área inicial projetada por Koeler.

A *Planta de Petropolis – 1846* (Biblioteca Nacional) também elaborada por Julio Frederico Koeler juntada ao relatório provincial não apresentou informações sobre identificação dos prazos aforados e dos colonos.

O documento histórico cartográfico seguinte, *Planta de Petropolis – 1850*, foi elaborada apenas quatro anos após o primeiro documento de Koeler e é neste documento que aparecem delimitados os novos nove quarteirões imperiais: Brasileiro, Presidencia, Francez, Inglez, Suisso, Woerstadt, Darmstadt, Rhenania Superior e Worms. A adição desses novos quarteirões imperiais mostra uma grande expansão da sua área gênese inicial, também configurada pelo acréscimo de 294 prazos relativos a estes novos quarteirões criados.

Na planta de Otto Reimarus de 1854 no que diz respeito aos quarteirões e prazos originais, quase nada se alterou da *Planta Koeler*. A *Planta Koeler* somou um total de 855 prazos imperiais e a planta de Reimarus um total de 848, ou seja, uma diferença de 7 prazos da planta histórica de 1846 para a de 1854. No entanto, vale ressaltar que o quarteirão Vila Imperial apresentou um acréscimo de 31 prazos imperiais (Tabela 1).

No que se refere aos novos quarteirões e prazos imperiais criados, houve uma adição de 351 prazos, isto é, houve um aumento de 41% da quantidade de prazos a serem aforados.

**Tabela 1.** Relação da quantidade de prazos de acordo com as quatro classes estipuladas pelo Relatório da Província de 1846

<i>Plantas x classes</i>	<i>Koeler 1846_cip</i>	<i>Koeler 1846_bn</i>	<i>Relatório província 1846</i>	<i>Desconhecida 1850_bn</i>	<i>Reimarus 1854_bn</i>
1º	210	207	216	n/a**	241
2º	26	26	26	26	26
3º	181	173	169	96	183
4º	431	441	440	704	744
Outros	7	7	—*	1	5
Total	855	854	851	827	1.199

**Fonte:** Laeta (2021).

\* Os prazos de construções específicas foram considerados na contagem do total de prazos de 1ª (na Villa Imperial) e 3ª classe (quarteirão Nassau), pois estes não foram discriminados no relatório da província.

\*\* Na planta 1850\_BN, a Villa Imperial apresenta somente os limites de seu quarteirão, ou seja, não possui a demarcação dentro de seus limites dos prazos imperiais pertencentes a Villa Imperial. Assim, não foi possível contabilizar o total de prazos de 1ª classe, e, deste modo, considerou-se como não aplicável (n/a) a divisão por prazos na Villa Imperial.

## 4. Discussão

A análise da configuração territorial de Petrópolis não foi definida a partir dos primeiros movimentos colonizadores em terras brasileiras, mas sim como um processo que se iniciou no final do século XVII e início do século XVIII. Pois no primeiro século de colonização, a colônia tinha característica marcante de sua configuração socioespacial ocorrer exclusivamente no litoral (Azevedo, 1992, p. 5; Straforini, 2006, p. 2).

Os caminhos do ouro foram fundamentais na criação da cidade de Petrópolis. Desde os tempos coloniais foram estabelecidos caminhos de ligação entre o litoral, mais especificamente entre as cidades portuárias e o interior da colônia, precisamente para a Comarca da Vila Rica, onde desde o final do século XVII descobriu-se ouro em abundância, e esta comarca contava com povoações de destaque, como Vila Rica (Ouro Preto) e Mariana (Costa, 2015, p. 86; Santos *et al.*, 2011, p. 295).

A partir da descoberta aurífera e da necessidade de instalação de postos fiscais para controle no tráfego destes metais que os caminhos para as Minas Gerais ganharam impulso, sempre com o intuito de encurtar o tempo e trazer mais segurança ao ataque de corsários.

Inicialmente durante o século XVII, foram abertos dois caminhos, o primeiro denominado de “Caminho Velho de São Paulo”, que fazia a ligação entre os portos do Rio de Janeiro e São Vicente (SP), continuando pelos vales dos rios Tietê e Paraíba do Sul. Posteriormente, por uma necessidade de segurança foi criada a variante terrestre, denominada “Variante do Caminho Velho”, entre Taubaté no vale do Paraíba do Sul e o porto de Paraty, acarretando assim um menor tempo na ligação terrestre com o porto do Rio de Janeiro, como também manteve sua rota mais próxima a costa brasileira.

Ainda na segunda metade do século XVII, devido a intensificação das atividades mineiras foi criado o “Caminho Novo”, cujo objetivo era transpor diretamente a serra do Mar, o que fazia o caminho ser ainda mais seguro e curto entre as Minas Gerais e o Rio de Janeiro, porto oficial do embarque de ouro nas “naus do quinto real” com destino à Corte de Lisboa. Este caminho também ficou conhecido como também conhecido como “Caminho do Garcia”, “Caminho do Couto”, “Caminho do Pilar” ou “Caminho Novo” do Rio de Janeiro para as minas.

Segundo Fróes (2006, p. 2), o “Caminho Novo” foi o ponto inicial para a ocupação das terras devolutas da bacia do Médio Inferior do Vale do Paraíba, onde mais tarde seriam delimitadas as terras do futuro município de Petrópolis, e confirmadas pela necessidade da abertura de um novo caminho, a “Variante do Caminho Novo”.

### 4.1. Os documentos históricos normativos de Petrópolis

O *Decreto Imperial nº 155*, foi assinado na data de 16 de março de 1843, no Paço da Boa Vista por Sua Majestade Imperial Dom Pedro II e por seu Mordomo da Casa Imperial, Paulo Barbosa.

No referido decreto já constavam algumas exigências a serem contempladas com o arrendamento no valor de 1:000\$000 (um conto de réis) anuais sobre a fazenda do Córrego Seco ao Major de Engenheiros Julio Frederico Koeler, dentre elas: reservar um terreno para edificar um palácio com dependências e jardins; um terreno para uma povoação, com prazos aforados a particulares de 5 braças<sup>1</sup> indivisíveis pelo preço que for convencionado, mas nunca menos de 1\$000 (mil réis) por braça; inclui também para serem aforados prazos com 100 braças de um lado e do outro da “Estrada Geral”; demarcar um terreno para edificar uma igreja; e um terreno destinado ao cemitério da futura povoação (Brasil, 1843).

O decreto imperial expressa o objetivo de rendimento com os prazos a serem aforados, pré-estipulando os valores a serem cobrados por braça.

Pouco depois do decreto imperial anteriormente mencionado, a Escripura de arrendamento da Fazenda denominada Corrego Seco, sita no alto da Serra da Estrella, que faz o Ex.<sup>mo</sup> Mordomo da Caza Imperial, ao Major de Engenheiros Julio Frederico Koeler é assinada em 26 de julho de 1843.

Este documento já em seu cabeçalho destaca que a fazenda do Córrego Seco, situada na serra da Estrella e arrendada a Julio Frederico Koeler pertencia aos bens particulares do imperador: “se convencionarão nas condições com que aquelle Major toma de arrendamento á Caza Imperial a Fazenda denominada <<Corrego Seco>>, sita na Serra da Estrella, pertencente aos bens particulares de Sua Magestade Imperial”.

O trecho destacado acima estabelece que as terras da fazenda do Córrego Seco pertencem aos bens particulares de Sua Magestade Imperial e por isso seu rendimento da cobrança de foro era destinado ao monarca em particular e não aos cofres públicos do império.

Destaca-se que neste documento no Art. 10. aparece pela primeira vez a menção ao documento histórico *Planta de Petropolis – 1846*, no qual o arrendatário, Julio Frederico Koeler, fica obrigado a levantar a “planta da futura Petropolis, e do Palacio e suas dependencias gratuitamente”.

No mesmo dia e ano em que foi lavrada a escritura do contrato de arrendamento da fazenda do Córrego Seco de Sua Magestade Imperial a Julio Frederico Koeler na data de 26 de julho de 1843, outro documento também foi redigido, estipulando as condições em que seriam aforadas as terras do contrato de arrendamento desta dita fazenda a Julio Frederico Koeler sob o título: *Condições com que se aforão terras na Fazenda de Sua Magestade o Imperador, denominada <<Corrego Seco>> e que fazem parte do contracto de arrendamento que faz o Sr. Major Koeler.*

O documento normativo, *Condições com que se aforão as terras de Petropolis, e as do arrendamento do Major Julio Frederico Koeler* foi elaborado três meses depois do anterior, na data de 30 de outubro de 1843, os quais são listados 16 artigos muitos dos quais ratificando e complementando os dispositivos do contrato anterior. Nele estão as instruções para os aforamentos dos prazos

<sup>1</sup> Antiga medida portuguesa, onde 1 braça equivale a 220 centímetros (Marques, 2001, p. 23).

arrendados a Koeler que formarão a futura Petrópolis em condições de enfiteuse.

Após aparecer pela primeira vez uma alusão a *Planta Koeler*, no Art. 10. do documento do contrato de arrendamento das terras de Sua Majestade Imperial a Julio Frederico Koeler, essa é a segunda vez que a *Planta Koeler* é citada. Assim, o Art. 1º estabelece que a “A futura Petrópolis constará do terreno descrito e marcado no mappa levantado pelo arrendatario Koeler, e do que para o futuro Sua Magestade Houver por bem designar”.

O último documento normativo é o Relatório do presidente da província do Rio de Janeiro, o senador Aureliano de Sousa Coutinho, na abertura da assembléa legislativa provincial no 1º de março de 1846, acompanhado do orçamento da recita e despeza para o anno financeiro de 1846 a 1847 – Colonização. Este documento foi publicado concomitante ao momento de finalização da *Planta Koeler* no ano de 1846 o qual distinguirá pela primeira os prazos por classes, cujos critérios serão as dimensões e principalmente o uso da terra.

Desta maneira, os prazos de 1ª classe possuem 10 braças de frente por 70 braças de fundo e ocupam a frente das ruas e praças da Villa Imperial e são os prazos próximos palácio imperial. Devem ocupar estes prazos negociantes, artistas e pessoas da corte que desejam passar o verão em um clima mais temperado da serra.

Os prazos de 2ª classe localizam-se nos terrenos do subúrbio da Villa Theresa e são os mais próximos ao Alto da Serra, ou seja, a Villa Imperial e possuíam como condição para aforamento as mesmas dos prazos de 1ª classe. Tinham estipulado como dimensões 15 braças de frente e 100 ou mais braças de fundo.

Os prazos de 3ª classe se localizavam a beira da “Estrada Geral” exceto os 26 prazos citados acima pertencentes a 2ª classe e eram destinados a artistas que não se ocupassem muito da lavoura. Possuíam as mesmas dimensões que os anteriores: 15 braças de frente por 100 ou mais braças de fundo.

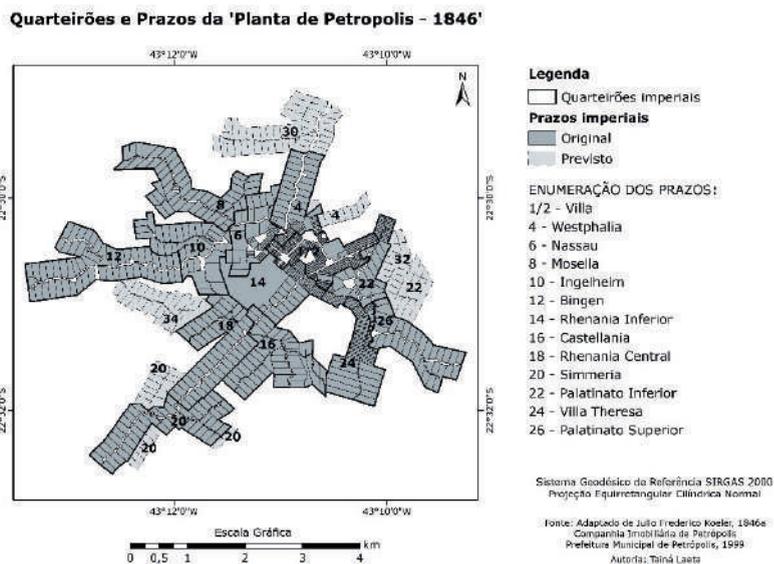
Por último, os prazos de 4ª classe, considerados todos os outros prazos existentes, ou seja, terrenos do interior, dentro dos limites da fazenda destinados a lavoura e com dimensões de 50 braças de frente por 100 ou mais braças de fundo.

A sucessão de elaboração dos acima expostos e suas normativas apontam já uma estratificação social. O que fica mais evidente neste último documento, o relatório provincial, com a distribuição ser condicionada ao ofício do foreiro.

#### **4.2 Os propósitos das plantas históricas cartográficas de Petrópolis**

O primeiro documento cartográfico de Petrópolis, de autoria de Julio Frederico Koeler, julga-se ser a planta de trabalho (ou de campo) do engenheiro alemão. O que se justificaria por observar na planta intervenções diretas como, por exemplo, anotações de cálculos e indicações de novos quarteirões e prazos a distribuir, isto é, a existência da delimitação de prazos destinados a expansão da cidade.

O propósito do documento cartográfico *Planta de Petrópolis – 1846* (Figura 5), é que esta planta serviu para o controle de distribuição e ocupação dos primeiros prazos do núcleo urbano inicial da cidade de Petrópolis e consequentemente realizar a cobrança de foro sobre os prazos aforados.



**Figura 5.** Enumeração estipulada por Koeler na *Planta de Petrópolis – 1846* da Companhia Imobiliária de Petrópolis para identificação dos quarteirões e prazos imperiais. Fonte: Laeta (2021), adaptado de Julio Frederico Koeler (1846a).

Tudo isso cumprindo as exigências que constavam nos documentos normativos. Nota-se esse propósito pelas suas anotações referentes aos nomes dos colonos (foreiros) a ocuparem os prazos, assim como, o número de cada prazo e indicação do local de construção dentro do limite de cada prazo e as dimensões dos prazos de acordo com sua classe (Figura 6).

Tanto assim serviu para controle, que a numeração dos prazos tinha em sua lógica ser sempre iniciada por número par, identificando cada quarteirão, onde os dois últimos números eram de controle de ordenação do foreiro e os números iniciais referirem-se ao número de identificação do quarteirão.

A *Planta de Petrópolis – 1846*, guardada na Biblioteca Nacional, também elaborada por Julio Frederico Koeler, teve como propósito ser juntada ao Relatório do presidente da Província do Rio de Janeiro, o senador Aureliano de Sousa e Oliveira Coutinho, na abertura da Assembléa Legislativa Provincial no 1º de março de 1846, acompanhado do orçamento da receita e despesa para o ano de 1846 a 1847 – Colonização. O que fica evidenciado por constar na planta a inscrição “Mandada levantar pelo Presidente da Província do Rio de Janeiro O

Excelentíssimo Senhor Conselheiro Aureliano de Souza Oliveira Coutinho, para se juntar ao seu relatório”.



**Figura 6.** Enumeração estipulada por Koeler na *Planta de Petrópolis - 1846* da Companhia Imobiliária de Petrópolis para identificação dos quarteirões e prazos imperiais. Fonte: Laeta (2021).

Neste relatório foram estipuladas as condições de distribuição dos prazos imperiais de acordo com a atividade desenvolvida. Para o processo de controle e distribuição, foi utilizada a planta anterior, ou seja, a planta de campo de Koeler, visto que na planta juntada ao relatório da província não constavam informações sobre o número dos prazos, como também os nomes dos foreiros.

Esta segunda planta elaborada por Koeler, contava com os mesmo onze quarteirões e duas vilas imperiais, mas com um total 854 prazos imperiais. Tal diferença pode ser relativizada por ser a primeira considerada de campo e a segunda ser o documento cartográfico juntado ao relatório provincial para assim implementar o “Plano-Povoação Palácio de Verão”.

Salienta-se que as plantas elaboradas por Koeler e guardadas da Companhia Imobiliária de Petrópolis e na Biblioteca Nacional, possuem respectivamente a escala de 1:5.000 e 1: 10.000, assim se enquadram dentro da escala de mapeamento cadastral.

Segundo Dorling & Fairbairn (1997, p. 83), os mapas cadastrais são mapas elaborados com o objetivo de ajudar no registro da propriedade das parcelas de terra, especificamente com a finalidade de cadastro fiscal e legal. As plantas elaboradas por Koeler apresentam essas finalidades, uma vez que, no que diz respeito ao cadastro fiscal há cobrança de foro e para o cadastro legal há o registro da parcela, tanto em escritura quanto no mapa.

A *Planta de Petrópolis - 1850*, foi elaborada apenas quatro anos após o primeiro documento de Koeler. Assim como a planta juntada ao relatório da província, não apresentou informações sobre identificação dos prazos aforados e dos colonos. Entretanto, é neste documento que aparecem delimitados os

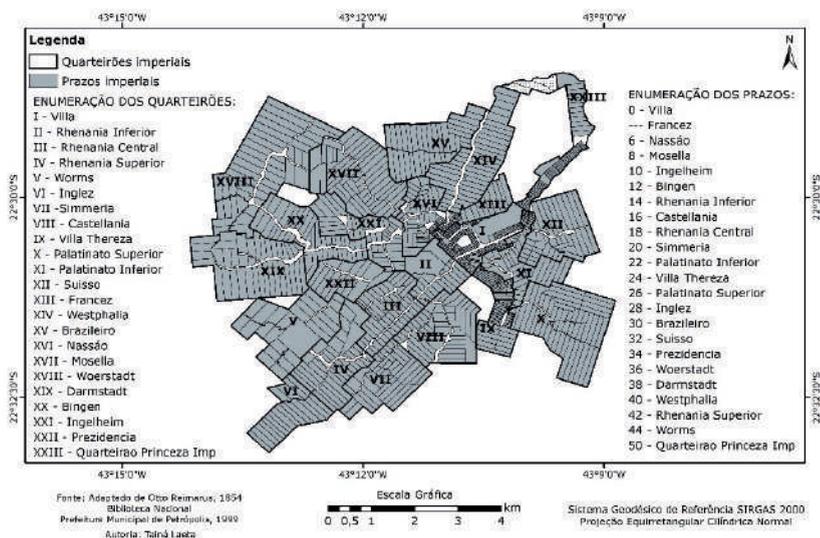
novos nove bairros imperiais: Brasileiro, Presidencia, Francez, Inglez, Suíço, Woerstadt, Darmstadt, Rhenania Superior e Worms, mostrando assim uma grande expansão da sua área gênese inicial.

Assim como a planta de Koeler, o quarto documento histórico cartográfico, a planta de Otto Reimarus enumera os bairros imperiais seguindo as mesmas orientações estipuladas por Koeler, tanto no que diz respeito aos bairros existentes nos bairros originais, quanto nos bairros e bairros previstos por Koeler (Figura 7). Com isso, constata-se o propósito de controle de ocupação dos bairros originais e controle de ocupação e distribuição dos novos bairros.

A planta de 1854 de Otto Reimarus, apesar de ter escala 1:34.000, ou seja, não se enquadrar na escala de mapeamento cadastral, cumpre o papel fiscal e legal de cadastro, visto que é utilizada até os dias de hoje para o controle e ocupação da cidade. Esta planta provavelmente foi elaborada a partir de um documento cartográfico em escala maior, e isto pode ser confirmado pelos documentos em escala menor elaborados anteriormente por Koeler. Reimarus, utilizou-se do artifício da legenda para representar feições que na *Planta Koeler* constavam no próprio desenho.

Na planta de Otto Reimarus, na vetorização das feições do documento cartográfico referente aos bairros imperiais, foram contabilizados um total de 1.199 bairros imperiais (Tabela 1). Já no que se refere aos bairros e vilas imperiais da planta de 1850 os mesmos se mantiveram, havendo no entanto o acréscimo do bairro "Prinzezalmp".

#### Quarteirões e Praços da 'Planta da Imperial Colonia de Petropolis - 1854'



**Figura 7.** Enumeração estipulada por Reimarus na *Planta da Imperial Colonia de Petropolis - 1854* para identificação dos bairros imperiais.

Fonte: Laeta (2021), adaptado de Otto Reimarus (1854).

A planta de Taunay de 1861, diferentemente das anteriores pode ser entendida para fins de vilegiatura, pois não possui informações importantes no que tange ao propósito de controle de ocupação sobre os prazos imperiais distribuídos.

Este último documento histórico cartográfico possui os limites de seus quarteirões não tão bem definidos e demarcados, e nem por essa razão pode ser entendido como sendo um produto mal elaborado, mas sim elaborado para atender aos seus propósitos, que era o de divulgar, disseminar para fins turísticos a imperial cidade de Petrópolis.

A planta de Taunay de 1861 está na escala 1:42.000, o que sugere que esta planta histórica tomou como referência um planta em escala maior para o traçado das feições que nela constam.

Após o exposto, compreende-se que os documentos históricos cartográficos *Planta de Petropolis - 1846* da Companhia Imobiliária de Petrópolis e *Planta da Imperial Colonia de Petropolis (reduzida para guia dos visitantes) - 1854*, em conjunto com os documentos normativos, serviram para o controle de ocupação da imperial cidade de Petrópolis, e conseqüentemente cobrança de foro, visto a manutenção das informações que constavam em ambas as plantas relativas ao número de identificação dos quarteirões e prazos imperiais.

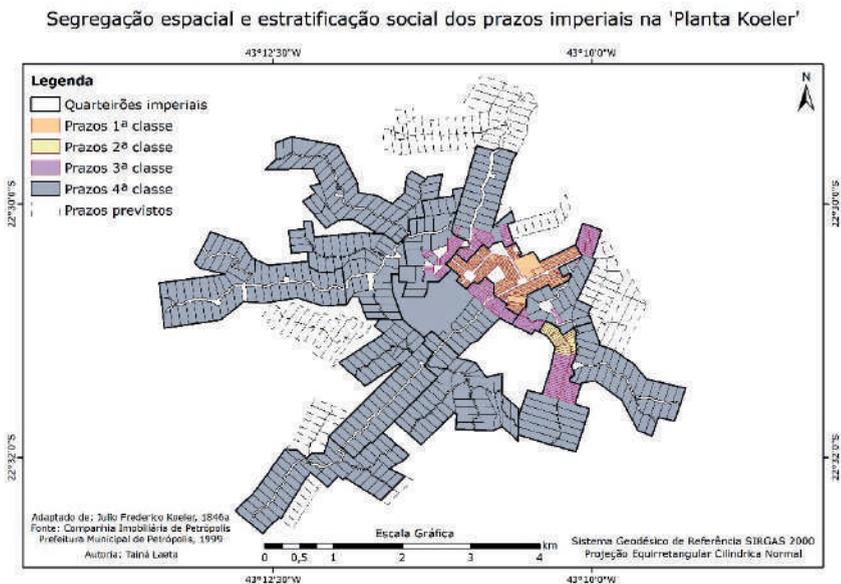
### **4.3 Segregação espacial e estratificação social no traçado urbano dos quarteirões e prazos imperiais da cidade imperial de Petrópolis**

A cidade de Petrópolis nasce com o ideário de uma colônia agrícola através do “Plano-Povoação Palácio de Verão”. Na compreensão do espaço urbano da cidade petropolitana para o recorte temporal estudado observa-se diferentes usos da terra justapostos acarretando o estabelecimento de áreas específicas.

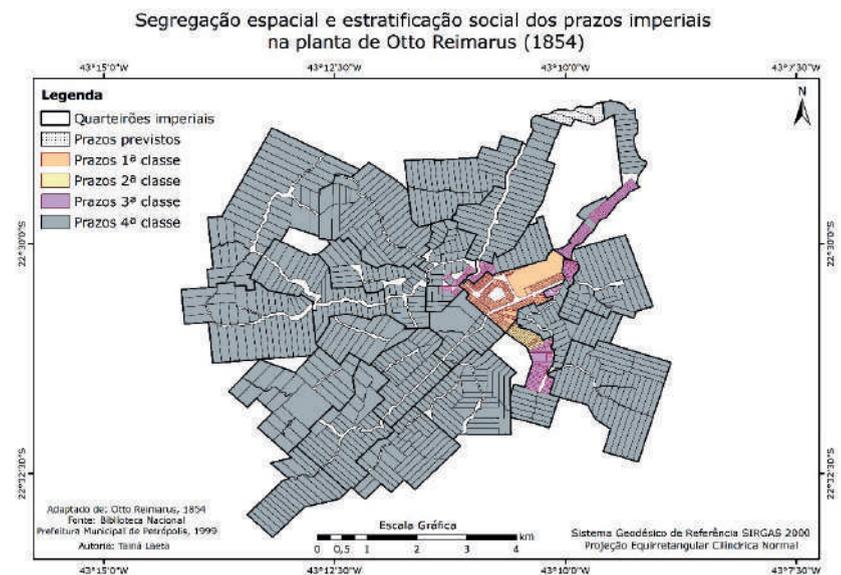
O processo de distribuição dos prazos nos quarteirões imperiais estabeleceu a estratificação social e segregação espacial a partir da *Planta de Petropolis - 1846* (Companhia Imobiliária de Petrópolis) e o relatório provincial de 1846.

Os prazos de 1ª e 2ª classes eram destinados mais a nobreza e a artistas, isto é, esses prazos configuravam uma área residencial com forma e conteúdo social diferenciado. Esses prazos se encontravam no próprio centro da cidade, também era nesta área central que se encontravam atividades de lazer, comercial e serviços. A área central guardava alto grau de especulação imobiliária por serem os prazos que se encontravam nas proximidades da residência de Sua Majestade Imperial (Figura 8).

Observou-se nas plantas históricas seguintes: Planta de Petropolis - 1850, Planta da Imperial Colonia de Petropolis (reduzida para guia dos visitantes) - 1854 (Figura 9) e para Imperial Cidade de Petropolis e os quarteirões coloniaes (planta reduzida) - 1861 a ratificação da mesma organização espacial. A organização espacial ou espaço urbano petropolitano, como o de qualquer espaço de cidade capitalista, é marcado por definições de áreas de uso da terra.



**Figura 8.** Segregação espacial e estratificação social dos prazos imperiais da *Planta Koeler*, distribuídos em 1ª, 2ª, 3ª e 4ª classe.  
 Fonte: elaboração própria, adaptado de Julio Frederico Koeler (1846a).



**Figura 9.** Segregação espacial e estratificação social dos prazos imperiais da *Planta da Imperial Colonia de Petropolis (reduzida para guia dos visitantes)* - 1854, distribuídos em 1ª, 2ª, 3ª e 4ª classe.  
 Fonte: elaboração própria, adaptado de Otto Reimarus (1854).

#### 4.4 Exemplo da morfologia urbana das cidades de origem portuguesa e alemã e a imperial cidade de Petrópolis

Moudon (1997, pp. 3-5), aponta que o estudo da morfologia urbana é o estudo das cidades e nesse sentido é importante analisar desde a formação das cidades e suas transformações. No pensamento das três escolas: italiana, francesa e alemã é possível observar em comum os elementos de análise morfológica: as construções (edificações), os jardins, as ruas, monumentos, parques, prazos, entre outros.

No entanto, é no pensamento da escola alemã que se destaca a preocupação nos estudos das formas urbanas, a partir da criação de tipologias de formas urbanas históricas e posterior análise dos planos urbanos de diferentes períodos de uma mesma cidade.

O geógrafo alemão Michael Robert Günter Conzen, grande propulsor da escola alemã no estudo sobre a morfologia urbana, considera a paisagem urbana como dinâmica. Para a análise da paisagem urbana criou a abordagem denominada “análise do plano”, que permitiu identificar os três elementos do plano, sendo eles: as ruas, os prazos e as construções. Conzen destaca ainda a importância do estudo dos limites e dimensões dos prazos, isto é, as medições metrológicas, pois traduzirão a reconstrução a área inicialmente projetada.

No plano urbano de Petrópolis do século XIX implementado por Koeler e a partir da análise da paisagem urbana proposta por Conzen é possível identificar essas áreas homogêneas, traduzidas pelas quatro classes estabelecidas no relatório provincial de 1846 e os prazos traçados na *Planta Koeler*.

Ainda no que se refere a morfologia urbana, a cidade de Petrópolis apresenta uma peculiaridade, pois apesar do Brasil ter sido colônia portuguesa, a cidade de Petrópolis se destaca por ter sido pensada e executada a partir do Major de Engenheiros Julio Frederico Koeler, de origem alemã.

Alguns estudos pretéritos apresentam as características e peculiaridades das cidades portuguesas e alemãs em território brasileiro. Destaca-se o estudo de Peluso Júnior de 1956, *Tradição e plano urbano das cidades portuguesas e alemãs no Estado de Santa Catarina*, onde o autor faz uma comparação de quatro cidades do estado de Santa Catarina fundadas até meados do século XIX e observa dois tipos de plano urbano.

Segundo ele, o mais difundido plano urbano tem como elemento principal a praça central e a igreja como um ícone emoldurado, e o segundo, mais raro, que se adapta ao relevo para estabelecer e assentar os sítios, tendo como elemento principal o centro comercial. Em seu estudo, o autor destaca os planos urbanos as cidades de Florianópolis e Lages como exemplos do primeiro tipo de plano, sendo este um modelo de cidades portuguesas. E no segundo tipo de plano urbano as cidades de Joinville e Blumenau o padrão alemão de cidade (Peluso Júnior, 1956, p. 326).

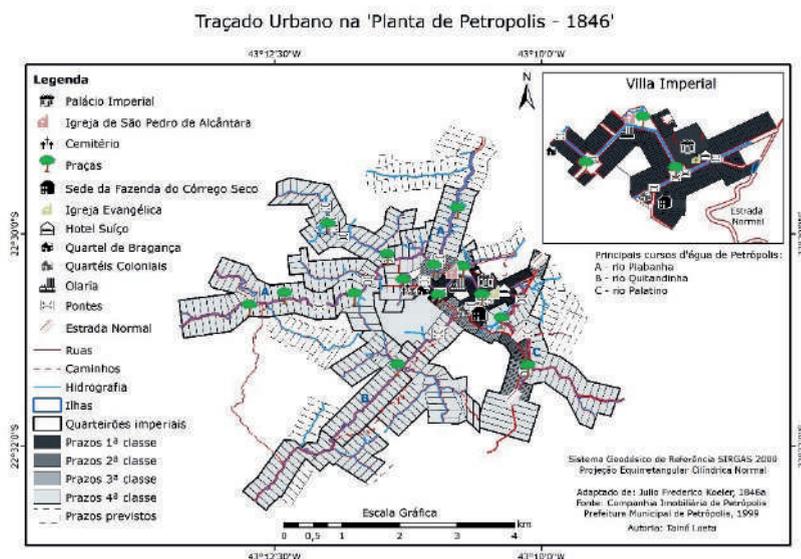
Nos núcleos de origem portuguesa, nas cidades de Florianópolis e Lages, as primeiras ruas adaptaram-se ao relevo, mas contando como ponto de referência para expansão da cidade a igreja com sua praça. Nesse sentido as ruas foram traçadas mais ou menos paralelas face a praça que se localizava de frente para o templo religioso, tornando esta área a zona central.

Já nas cidades de Blumenau e Joinville com origem de colonização alemã tinham como elemento principal a rua comercial. O relevo exerceu grande influência em seu traçado, mas também permitiu o traçado de quadras regulares em áreas mais planas.

No que tange a cidade de Petrópolis, observa-se similaridade com os elementos norteadores nos traçados das cidades de Blumenau e Joinville. A colonização da região Serrana e conseqüentemente a cidade de Petrópolis nasce da necessidade da abertura de um novo caminho para escoar a exploração aurífera proveniente das Minas Gerais com destino ao porto do Rio de Janeiro e que posteriormente seguia para Lisboa.

Desta maneira, a primeira correspondência de Petrópolis como as cidades de Blumenau e Joinville de colonização alemã era a função comercial, a primeira tinha como função porto fluvial e a segunda como porto marítimo para exportar a produção pecuária da colônia.

Outra similaridade além da função comercial era a direção dos arruamentos que se orientava pelo relevo. No que está relacionado ao traçado urbano de Petrópolis e os três principais cursos d'água, estes foram delineadores no processo de ocupação, pois Koeler traçou os prazos imperiais a partir das margens dos rios Piabanha, Quitandinha e Palatino e seus tributários, como pode ser evidenciado na Figura 10. Mesmo que o traçado urbano não seja regular de xadrez, apresenta uma certa regularidade no que diz respeito as dimensões dos prazos de acordo com a classe (tipo de uso) e com o frontispício de cada prazo voltado para o curso d'água.



**Figura 10.** Traçado urbano de Petrópolis delineado pelos três principais cursos d'água: Piabanha, Quitandinha e Palatino, e seus tributários.

Fonte: Laeta (2021).

## 5. Conclusão

Petrópolis nasce com alguns propósitos já estipulados, ou seja, não é uma cidade que nasce ao acaso. Conjunturas políticas, econômicas e sociais são pontos de partida para uma organização espacial ou reorganização espacial de Petrópolis, onde os momentos conturbados da Corte, tanto no que tange as questões políticas e econômicas contribuíram para o surgimento da cidade e que implicaram nas mudanças da dinâmica social criada na imperial cidade.

As terras da fazenda do Córrego Seco eram particulares do imperador, por isso muitas vezes há uma ligeira confusão na distinção do que é público e do que é privado. As orientações que se observa nos documentos normativos foram postas em prática muitas vezes transvestidas do papel a ser exercido pelos agentes sociais Estado e proprietários fundiários concentrados na figura do imperador.

Junto ao suposto “Estado”, aqui representado pelo próprio imperador, a classe dominante também contribui para o estabelecimento da segregação residencial e estratificação social, pois a ela é ofertado a escolha das melhores áreas para habitar.

Assim, nos limites estabelecidos pela *Planta Koeler*, os prazos da Villa Imperial, orientados pelos documentos históricos normativos, são ocupados por pessoas de alto poder aquisitivo, seja por pertencerem a Corte ou por proximidade com pessoas que pertencem a Corte, estabelecem uma segregação residencial e social.

A intensão não é produzir algo e por isso não há necessidade de prazos de grandes dimensões, mas sim ter sua moradia próximo a residência imperial. É a lógica da necessidade do *status* social.

Os mapas são documentos que permitem o registro das transformações espaciais de uma cidade, pois neles são inscritas as mudanças ocorridas na paisagem, tanto natural como construída. As plantas georreferenciadas possibilitaram uma sobreposição dos limites dos quarteirões e prazos imperiais, o que contribuiu para constatar as mudanças ocorridas no espaço geográfico da cidade imperial de Petrópolis, revelando uma maior expansão dos prazos referentes a 4ª classe, pertencentes aos nove novos quarteirões imperiais já na *Planta de Petropolis – 1850*, isto é, apenas quatro anos após a elaboração do primeiro documento histórico cartográfico da cidade, a *Planta Koeler*.

Como continuidade ao estudo do passado do espaço geográfico petropolitano, após o processo de georreferenciamento foram extraídos e espacializados os nomes geográficos (topônimos) dos cinco documentos históricos cartográficos. O objetivo deste próximo estudo é além de espacializar entender a origem e motivação dos nomes geográficos constantes nos referidos documentos históricos cartográficos para compreender melhor a dinâmica do processo de ocupação da cidade imperial de Petrópolis.

## Bibliografia

Ambrozio, J. C. G. (2012). O Território da Enfiteuse e a Cidade de Petrópolis – RJ, Brasil. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. Barcelona, 418 (39), 1-7.

- Azevedo, A. (1992). Vilas e Cidades no Brasil Colonial. Ensaio de geografia urbana retrospectiva. *Revista Terra Livre – AGB*, (10), 23-78.
- Dorling, D. & Fairbairn, D. (1997). *Mapping: Ways of Representation the World*, 1st edition. Edinburgh Gate: Prentice Hall.
- Fróes, G. K. (2002). *Algumas Datas Anteriores a 17 de Junho de 1859. Acervo Histórico Gabriel Kopke Fróes, 1953*. Instituto Histórico de Petrópolis.  
[http://www.ihp.org.br/lib\\_ihp/docs/gkf19530800.htm](http://www.ihp.org.br/lib_ihp/docs/gkf19530800.htm)
- Fróes, C. O. (2006). Petrópolis – A Saga de Um Caminho – O Caminho Novo (Capítulo 1). Tribuna de Petrópolis. Instituto Histórico de Petrópolis.  
[http://ihp.org.br/26072015/lib\\_ihp/docs/cof20060120.htm](http://ihp.org.br/26072015/lib_ihp/docs/cof20060120.htm)
- Geocart – Laboratório de Cartografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (2015). Acervo fotográfico: tomada total e conjunto de 191 fotos da Planta de Petrópolis - 1846. Rio de Janeiro: Laboratório de Cartografia (GeoCart), Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (2011). *Sinopse do Censo Demográfico 2010*. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro.
- Laeta, T. (2021). Cartografia histórica da imperial cidade de Petrópolis: subsídios para uma análise de geografia histórica no século XIX (1846-1861) [Tese, Departamento de Geografia, Instituto de Geociência, Universidade Federal do Rio de Janeiro], Rio de Janeiro.
- Lordeiro, M. S. (2005). *Petrópolis: rios e montanhas*. Petrópolis: Edição do Autor.
- Marques, M. S. (2001). *Cartografia Antiga: tabela de equivalências de medidas*. Lisboa: Biblioteca Nacional.
- Moudon, A. V. (1997). Urban Morphology as an Emerging Interdisciplinary Field. *Urban Morphology (International Seminar on Urban Form)*. Birmingham, vol. 1, pp. 3-10. ISSN: 1027-4278.
- Oliveira Junior, D. L. O. (1926) (Org.). *Legislação sobre os Municípios, Comarcas e Districtos – abrangendo o período de março de 1835 a 31 de dezembro de 1925*. Rio de Janeiro: Typ. Do Jornal do Commercio, de Rodrigues & C.
- Peluso Júnior, V. A. (1956). Tradição e Plano Urbano das Cidades Portuguesas e Alemãs. *Revista Boletim Geográfico*. Rio de Janeiro, XIV (133), 325-357.
- Santos, M. M. D. et al. (2011). *Capitania de Minas Gerais no Início dos Oitocentos, Segundo a Cartografia de Caetano Luiz de Miranda: informações fidedignas?* (pp. 267-300) Arquivos do Museu de História Natural. Belo Horizonte.
- Straforini, R. (2006). Estrada Reais no Século XVIII: a importância de um complexo sistema de circulação na produção territorial brasileiro. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 218 (33), 247-263.

## Fontes documentais

- Brasil (1843). Decreto Imperial, número 155 – referente ao arrendamento da Fazenda Corrego Secco ao Major de Engenheiros Julio Frederico Koeler na data de 16 de março de 1843. Archivo Publico Nacional – Rio de Janeiro.
- Brasil (1846). Lei nº 397, de 20 de maio de 1846. O presidente da província eleva a categoria de freguesia o curato de Petrópolis.  
[http://memoria.bn.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=094170\\_01&pesq=Petrópolis&pasta=ano%20184&hf=memoria.bn.br&pagfis=30021](http://memoria.bn.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=094170_01&pesq=Petrópolis&pasta=ano%20184&hf=memoria.bn.br&pagfis=30021)
- Brasil (1846). “Relatório do presidente da Província do Rio de Janeiro, o senador Aureliano de Sousa e Oliveira Coutinho, na abertura da Assembléa Legislativa Provincial no 1º de março de 1846, acompanhado do orçamento da receita e despesa

para o ano financeiro de 1846 a 1847. Nictheroy, em 1º de maio de 1846.”. Center of Research Libraries – Brazilian Government Document Digitalization Project. <http://brazil.crl.edu/bsd/bsd/776/000079.html>

Brasil (1857). Lei nº 961, de 29 de setembro de 1857. Decreta a elevação de cidade as vilas de Valença e Vassouras e a povoação de Petrópolis. <http://memoria.bn.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=217280&pesq=Lei%20961&pasta=ano%20185&hf=memoria.bn.br&pagfis=13842>

## Documentos históricos

“Escritura de arrendamento da Fazenda denominada Corrego Seco, sita no alto da Serra da Estrella, que faz o Ex.<sup>mo</sup> Mordomo da Caza Imperial, ao Major de Engenheiros Julio Frederico Koeler” – na data de 26 de julho de 1843. Comissão do Centenário de Petrópolis – Prefeitura Municipal de Petrópolis (reprodução em foto-cópia do exemplar editado pela Tipografia Laemmert). Petrópolis: Tipografia Ipiranga, 1943a., 15 pp.

“Condições com que se aforão terras na Fazenda de Sua Majestade o Imperador, denominada <<Corrego Seco>> e que fazem parte do contracto de arrendamento que se faz o Sr. Major Koeler.” – na data de 26 de julho de 1843. Comissão do Centenário de Petrópolis, Prefeitura Municipal de Petrópolis (reprodução em foto-cópia do exemplar editado pela Tipografia Laemmert). Petrópolis: Tipografia Ipiranga, 1943a., 15 pp.

“Condições com que se aforão as terras de Petrópolis, e as do arrendamento do Major Julio Frederico Koeler.” – na data de 30 de julho de 1843. Comissão do Centenário de Petrópolis – Prefeitura Municipal de Petrópolis (reprodução em foto-cópia do exemplar editado pela Tipografia Laemmert). Petrópolis: Tipografia Ipiranga, 1943a., 15 pp.

## Documentos cartográficos

Planta de Petropolis – 1850. Rio de Janeiro: Biblioteca Nacional, 1850. Litografia desconhecida, 93,3 x 97,8 cm. [http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo\\_digital/div\\_cartografia/cart525848/cart525848.jpg](http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo_digital/div_cartografia/cart525848/cart525848.jpg)

Koeler, Julio Frederico. Planta de Petropolis – 1846. Petrópolis: Companhia Imobiliária de Petrópolis, 1846a. Litografia desconhecida, 128,9 x 128,2 cm. Escala gráfica de 500 brassas.

Koeler, Julio Frederico. Planta de Petropolis – 1846. Rio de Janeiro: Biblioteca Nacional, 1846b. Lithographia Vítor Larré, 61,5 x 65,85 cm. Escala gráfica de 600 Braças. Disponível em: [http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo\\_digital/div\\_cartografia/cart233811/cart233811.jpg](http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo_digital/div_cartografia/cart233811/cart233811.jpg)

Prefeitura Municipal De Petrópolis (Petrópolis). Base Cartográfica do Município de Petrópolis. Petrópolis: Secretaria de Planejamento e Urbanismo, 1999. Escala 1:10.000.

Reimarus, Otto. Planta da Imperial Colonia de Petropolis – reduzida para guia dos visitantes – 1854. Rio de Janeiro: Biblioteca Nacional, 1854. Lithographia. Imperial de Resenburg. 1854, 29,4 x 41,2 cm. Escala gráfica de 3.000 Braças. [http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo\\_digital/div\\_cartografia/cart176710/cart176710.jpg](http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo_digital/div_cartografia/cart176710/cart176710.jpg)

Taunay, Carlos Augusto. Imperial Cidade de Petropolis e os quarteirões coloniaes (planta reduzida) – 1861. Petrópolis: Arquivo Histórico do Museu Imperial, 1861, Ibram, MinC, nº 29/2017, SGI 1152/2017-07. Litografia desconhecida, 28 x 22 cm. Escala gráfica de 2.500 braças.

RESEÑAS





## Verdugo Chaura, Danilo (2022). *Ráster con Terra. Esto va de Filas, Columnas, Cotas y Píxeles*. Santiago, 741 pp.

[https://www.researchgate.net/publication/365801727\\_RasterconTerra](https://www.researchgate.net/publication/365801727_RasterconTerra)

Patricio Lamperein Polo<sup>1</sup>

El libro *Ráster con Terra* de Danilo Verdugo, autoeditado y dispuesto a la comunidad de manera libre y sin restricciones, surge como resultado de la extensa preparación de clases prácticas y teóricas del uso de la plataforma R a profesionales del área de las denominadas geociencias.

A lo largo de sus más de 700 páginas recorre las más variadas temáticas, tales como batimetría, geomorfometría, población, clima, análisis digital de imágenes y misiones espaciales, todo enfrentado desde la perspectiva de los datos en formato ráster y su uso con el lenguaje R, con casos prácticos y ejercicios, comenzando desde la instalación de aplicaciones, hasta aplicaciones avanzadas de clasificación de imágenes satelitales.

El libro se compone de nueve secciones principales: I Plataforma R, II Proyectos en R, Información Ráster, IV Geomorfometría, V Productos Cartográficos, VI Aplicación de Datos Ráster, VII Observación de la Tierra, VIII Misiones Espaciales y IX Aplicación.

*Plataforma R* presenta las herramientas informáticas, su historia, filosofía y aspectos técnicos básicos. Un extenso y detallado curso práctico acompaña los fundamentos teóricos.

*Proyectos R* nos muestra las mejores prácticas utilizando la herramienta informática, organizar los archivos, carpetas, datos y otros elementos de manera eficiente para desarrollar proyectos de largo plazo y extensión. También se detiene en los aspectos de sintaxis que facilitan dichas tareas.

*Información Ráster* trae una extensa discusión del formato de datos, como también detalladas descripciones de las operaciones básicas, manejos de sistema de coordenadas y como definir un área de estudio.

*Geomorfometría* se encarga de dar una extensa y detallada revisión a la ciencia encargada de estudiar la superficie terrestre y del fondo marino. Se estudian los pasos preliminares para descargar, preparar y organizar la información de cotas y pasa a una profunda descripción de los aspectos teóricos y prácticos del análisis de dicha información.

<sup>1</sup> Consultor Fuerza Aérea de Chile e independiente, Chile, correo electrónico: [patricio.lamperein.polo@gmail.com](mailto:patricio.lamperein.polo@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9899-4274>

*Productos Cartográficos* nos acompaña en el uso de los datos en formato ráster para la preparación, diseño y construcción de productos gráficos, desde mapas, pasando por gráficos tradicionales hasta mejoras estéticas. Se presentan casos de estudio reales.

*Aplicación de Datos Ráster* detalla el uso de información de Población y Clima, para la generación de productos gráficos, como estadísticos. Se detallan conceptos teóricos y prácticos para la descarga de datos tanto históricos como actuales, siempre considerando la calidad de ellos.

*Observación de la Tierra* se encarga de introducir al lector en los fundamentos de la teledetección espacial pasiva, una extensa discusión del espectro electromagnético, sus propiedades y fundamentos físicos son acompañados con ejercicios prácticos. A continuación, se pasa a una detallada descripción de los elementos básicos de clasificación de las imágenes satelitales, concepto de firma espectral y casos prácticos para descarga de datos y su uso mediante R.

*Misiones Espaciales* describe las principales misiones espaciales que proveen información gratuita de resolución media. Encontramos las misiones MODIS, Landsat y Sentinel, para cada una de ellas se describen las propiedades técnicas de los satélites, órbitas y otras propiedades operativas, como una detallada descripción de los sensores disponibles. Bandas, resoluciones, formato de los productos disponibles y donde conseguirlos son descritos en detalle y acompañados del código R para su uso y explotación. Se incluye un capítulo dedicado a la teledetección termal y sus usos prácticos.

*Aplicación* es la última sección del libro y en ella se analizan, describen y ejercitan las técnicas más comunes de procesamiento digital de imágenes. Temas tales como construcción de Mosaicos, modelamiento armónico (series temporales), uso de bandas, umbrales, índices espectrales y clasificación son tratados desde la perspectiva práctica usando los productos de las misiones espaciales descritas y el lenguaje R.

Para finalizar, el autor destaca que todo el texto, incluyendo el diseño, diagramación, manejo de ilustraciones, formato e impresión, ha sido realizado exclusivamente con las herramientas descritas en el mismo texto, mostrando con esto un caso real de la potencia y versatilidad del lenguaje R.

Solo resta indicar que la presente obra se convierte en uno de los textos de estudio más completo y extenso del tema en idioma español.

Vidal Solórzano Villegas, J. y Alejandro Perilla Suárez, G. (2022), *Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento*. Morelia, Editorial del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 192 pp. ISBNs 978-607-30-6696-9 y 978-958-5183-55-1

Jean-François Mas<sup>1</sup>

Google Earth Engine (GEE) es una herramienta basada en la nube para el análisis científico y la visualización de datos geoespaciales. Combina un catálogo de varios petabytes de imágenes satelitales (Landsat, MODIS, Sentinel) y conjuntos de datos geoespaciales con capacidades de análisis a escala planetaria. Permite a científicos y desarrolladores detectar cambios, mapear tendencias y cuantificar diferentes procesos en la superficie de nuestro planeta utilizando una gran cantidad de datos (“big data”)

Amani *et al.* (2020) estudiaron 450 artículos de revistas publicados en 150 revistas entre enero de 2010 y mayo de 2020 derivados de estudios en los cuales se utilizó GEE. Estos autores observaron que GEE ha sido empleado en una amplia gama de aplicaciones, como la clasificación de cobertura/uso del suelo, hidrología, planificación urbana, desastres naturales, análisis climáticos y procesamiento de imágenes. La cantidad de publicaciones de GEE ha aumentado significativamente durante los últimos años y se espera que más usuarios de diferentes campos utilicen GEE para procesar “big data”.

Sin embargo, la documentación sobre GEE en español es aún incipiente y se limita a un nivel muy básico. En este contexto, el libro *Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento*, de Jonathan V. Solórzano Villegas y Gabriel A. Perilla Suárez viene a llenar este vacío.

La obra fue desarrollada en el ámbito de un proyecto del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento a la Enseñanza (PAPIME) de la Universidad Nacional Autónoma de México (<https://lae.ciga.unam.mx/proyectos/geomatica>) y es fruto de la colaboración entre el Instituto Humboldt (Colombia) y el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la UNAM

<sup>1</sup> Laboratorio de Análisis Espacial, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, correo electrónico: [jfmas@ciga.unam.mx](mailto:jfmas@ciga.unam.mx). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6138-9879>.

(México). A lo largo de doce capítulos, permite al lector sin ningún conocimiento previo alcanzar un nivel relativamente avanzado. El primer capítulo describe algunos aspectos generales de GEE, así como el propósito y la organización del libro. El segundo capítulo nos permite dar nuestros primeros pasos en GEE: describe el proceso de registro, la interfaz gráfica y la sintaxis del lenguaje de programación de la interfaz de programación de aplicaciones (API) de GEE.

Los tres capítulos siguientes muestran las funciones básicas para ayudar al usuario a interactuar con la API: El capítulo 3 (interfaz de usuario) muestra la interacción entre la consola y la pantalla de mapa, así como la creación de gráficos y la exportación de objetos desde GEE. El capítulo 4 nos enseña cómo importar datos a GEE como por ejemplo un marco que delimite el área de estudio. El capítulo 5 presenta los diferentes tipos de objetos que se pueden manejar dentro de GEE y nos explica las diferencias entre la programación del lado del servidor y del usuario.

A continuación, en cinco capítulos, se describen los tipos de objetos más comúnmente utilizados en GEE: 1) geometrías, 2) vectores, 3) colecciones de vectores, 4) imágenes y 5) colecciones de imágenes, así como los métodos más frecuentemente usados para manejar estos tipos de objeto.

En el capítulo 11, se describen algunos métodos más avanzados para procesar conjuntamente información vectorial y ráster incluyendo métodos geostatísticos como interpolaciones y kriging.

El último capítulo muestra los diferentes pasos para llevar a cabo la clasificación supervisada de una imagen multiespectral desde la selección de los campos de entrenamiento, la clasificación con varios algoritmos y la evaluación con base en una matriz de confusión.

La obra incluye el código de todos los ejemplos, permitiéndole al lector implementarlos directamente en línea. Además, contiene capturas de pantalla de los ejercicios, lo cual facilita el seguimiento de los mismos. El libro es por lo tanto el compañero ideal para un aprendizaje autónomo del manejo y análisis de datos espaciales con GEE. Es importante aclarar que esta obra no cubre todas las operaciones que pueden realizarse con GEE, como por ejemplo métodos basados en inteligencia artificial, análisis de series de tiempo, segmentación de imágenes o la creación de aplicaciones. Sin embargo, después de aprender las bases con este libro, el lector tendrá las herramientas para adquirir fácilmente un nivel de manejo más avanzado. Es también importante notar que la experiencia adquirida en el manejo de GEE facilitará mucho el aprendizaje de otros lenguajes y plataformas (por ejemplo, JavaScript o Python en Pangeo <https://pangeo.io/>).

## Bibliografía

Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S.A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S.M., Alizadeh Moghaddam, S.H., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M. Parsian, S., Wu, Q. & B. Brisco (2020). Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>

## Definición de la Revista

La *Revista Cartográfica* se publica desde 1952, es una publicación de la Comisión de Cartografía del Instituto Panamericano de Geografía e Historia un Organismo Especializado de los Estados Americanos (OEA).

El objetivo de la Revista es contribuir a la difusión del conocimiento en las áreas de cartografía, geodesia e información geográfica en general; promoviendo un enfoque que contribuya a compartir investigaciones, estudios y publicaciones en las áreas de conocimiento que son de interés para la revista.

La Revista publica artículos científicos (investigación, revisión y temáticos) y reseñas en los cuatro idiomas oficiales del IPGH (español, inglés, francés y portugués). Los artículos que se propongan para su publicación deberán ser originales y no estar publicados o propuestos para tal fin en otra revista.

Desde 2016 tiene una periodicidad semestral (enero-junio / julio-diciembre). La recepción de artículos está abierta permanentemente.

## Proceso de evaluación por pares

En atención a las buenas prácticas editoriales la *Revista Cartográfica* los artículos que cumplan los requisitos formales y de calidad serán evaluados por pares académicos externos a la institución editora. Se aplicará el sistema de evaluación "doble ciego".

## Secciones

### *Artículos:*

- Artículo de investigación: documentos que presentan resultados de nuevas investigaciones, u otras contribuciones originales que sean de aporte a las ciencias y disciplinas de interés para la Revista.
- Artículo de revisión: documentos que analicen, sistematicen e integren resultados de material ya publicado sobre un área del conocimiento, con el objeto de divulgar los avances y las tendencias de desarrollo en dicha área. Requiere una cuidadosa y rigurosa revisión bibliográfica del tema, un artículo de revisión no debería considerar menos de 60 referencias directas e indirectas. Solo para áreas de conocimiento de desarrollo muy reciente se consideran artículos de revisión con un número menor de referencias.
- Artículos temáticos: documentos que respondan a una convocatoria de la Revista para conformar un número temático coordinado por un destacado especialista como editor invitado.

### *Reseñas:*

Documentos que presentan un análisis crítico de libros u otras monografías que sean significativa para las ciencias y disciplinas de interés de la revista, que hayan sido publicados en los últimos tres años y que cuenten con ISBN. De forma excepcional se aceptarán reseñas de libros no actuales, clásicos, que sean significativos o de referencia para análisis y estudios actuales.

## Norma para autores

Los artículos y reseñas se enviarán únicamente en formato digital a través de este enlace <https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar>. Por lo tanto, es necesario que el autor este registrado de forma correcta y que disponga de usuario y contraseña.

Los archivos de texto se enviarán en formato Word, utilizando las plantillas correspondientes para que cada tipo de documento aceptado por la Revista.

Para asegurar la evaluación ciega del artículo, el archivo debe enviarse sin datos ni metadatos que permitan la identificación del autor. No se debe incluir nombre, afiliación, correo electrónico u organismo financiador en el documento. Estos datos se recogen de manera separada en la plataforma OJS, cuando se ingresan los metadatos del envío. Se solicita completar obligatoriamente los siguientes campos del formulario correspondiente a Autoría y colaboradores/as: Nombre/s y Apellido/s, contacto (e-mail), país, identificador ORCID y afiliación institucional.

Los documentos que no cumplan los requisitos de anonimato serán retirados del proceso de evaluación.

La revisión de los artículos incluye el uso de software antiplagio Ithenticate.

Los **Artículos** deberán tener una extensión máxima de 25 páginas, incluyendo figuras, tablas y bibliografía.

Las figuras y tablas deberán ubicarse dentro del texto. Las figuras se deben enviar por separado en formato JPG o PNG, con una resolución mínima de 300 dpi/ppp (o superior de acuerdo con el tamaño de la figura) sin compresión y a color. Para la impresión del número de la Revista se modificarán a escala de grises, siempre que no afecte la correcta comunicación de la información, en particular los mapas.

Las citas y referencias bibliográficas se harán según las Normas APA. Se recomienda el uso de gestores de referencias bibliográficas, como Zotero o Mendeley. Se debe incluir enlace DOI o enlace web en todos los casos que sea posible.

Las **reseñas** tendrán una extensión máxima de 8.000 caracteres con espacios incluidos.

Más información:

[www.revistasipgh.org/index.php/rcar/Directrices](https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/Directrices)

Evaluación de pares:

<https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/EvaluacionPares>

Dra. María Ester Gonzalez  
Editora  
Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía  
Universidad de Concepción  
Victoria 486-490, CP 4030000, Concepción, Chile  
Correos electrónicos:  
[editor\\_revista\\_cartografica@ipgh.org](mailto:editor_revista_cartografica@ipgh.org) | [mariaesgonzalez@udec.cl](mailto:mariaesgonzalez@udec.cl)

No se devolverá el material enviado.

### **Función editorial del Instituto Panamericano de Geografía e Historia**

El IPGH publica seis revistas, impresas y distribuidas desde México. Estas son: *Revista Cartográfica*, *Revista Geográfica*, *Revista Geofísica*, *Revista de Historia de América*, *Antropología Americana* y *Revista de Arqueología Americana*.

Se invita a todos los investigadores y profesionales de las áreas de interés del IPGH: cartografía, geografía, historia, geofísica y ciencias afines, a que presenten trabajos de investigación para que sean publicados en nuestras revistas científicas.

Si requiere mayor información, favor de comunicarse a:

Departamento de Publicaciones  
Secretaría General del IPGH  
Ex-Arzobispado 29, Colonia Observatorio, 11860 Ciudad de México, México  
Tels.: (+52-55) 5277-5888 / 5515-1910  
Correo electrónico: [publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org)

Edición del  
Instituto Panamericano de Geografía e Historia  
realizada en su Departamento de Comunicación Social,  
Ex Arzobispado núm. 29, Col. Observatorio  
11860, Ciudad de México, México  
Tels.: 5277-5791 / 5277-5888 / 5515-1910  
[publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org)  
2022



Diseño y creación de una herramienta geotecnológica para el análisis de la accidentalidad vial en la Ciudad de Toluca, México, SIGESEV-TC *José Miguel Muñoz y Raquel Hinojosa* • Dendrogeomorphology as a tool to depict hydrogeomorphic processes in the tropics *Adolfo Quesada-Roman* • Relaciones entre la estructura urbana y la movilidad cotidiana en Ciudad Juárez, Chihuahua, México *Isaac Chaparro Hernández* • Analyzing Segregation of Informal Residents in Latin American Cities' Periphery Using Remote Sensing *Sonia Morales* • Análisis espaciotemporal del proceso de pérdida forestal en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Michoacán, México *Araceli Benítez Franco* • Los nuevos corredores en altura en la Ciudad de México. Análisis de su proceso, aplicación y visualización en un Sistema de Información Geográfica *Víctor Hugo Aquino Illescas* • A Cartografía histórica de Petrópolis e uma análise geográfica sincrônica para o século XIX (1846-1861) *Tainá Laeta, Manoel do Couto Fernandes y Mário Gonçalves Fernandes* • Ráster con Terra. Esto va de Filas, Columnas, Cotas y Píxeles *Patricio Lamperein Polo* • Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento *Jean-François Mas*

ISSN 2663-3981

**AUTORIDADES DEL  
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA  
2022-2025**

**PRESIDENTE** Dra. Patricia Solís (Estados Unidos)  
**VICEPRESIDENTE** Lic. Rocsanda Pahola Méndez Mata (Guatemala)

**SECRETARIO GENERAL**  
Mtro. Antonio Campuzano Rosales  
México

**COMISIÓN DE CARTOGRAFÍA**

*(Costa Rica)*

Presidente:

MSc. Max Lobo Hernández

Vicepresidente:

MSc. Christian Núñez Solís

**COMISIÓN DE GEOGRAFÍA**

*(Chile)*

Presidente:

Dr. Hermann Manríquez Tirado

Vicepresidente:

Dr. Rodrigo Barriga Vargas

**COMISIÓN DE HISTORIA**

*(República Dominicana)*

Presidente:

Dr. Filiberto Cruz Sánchez

Vicepresidente:

Dra. Reina Cristina Rosario Fernández

**COMISIÓN DE GEOFÍSICA**

*(Ecuador)*

Presidente:

Dr. Mario Calixto Ruiz Romero

Vicepresidente:

Dra. Alexandra Alvarado Cevallos

**MIEMBROS NACIONALES DE LA COMISIÓN DE GEOGRAFÍA**

Argentina	Agrim. Sergio Rubén Cimbaro
Belice	
Bolivia	Cap. DIM. Saul Ronald Gutierrez Loza Romero
Brasil	
Chile	Dr. Carlos Mena Frau
Colombia	Ing. Pamela Mayorga Ramos
Costa Rica	MSc. Marta Eugenia Aguilar Varela
Ecuador	Mayor Ricardo D. Coyago
El Salvador	Lic. Edwin Denis Hernandez
Estados Unidos	Eric van Praag
Guatemala	Ing. Marcos Osmundo Sutuc Carrillo
Haití	Prof. David Telcy
Honduras	Dilma Doris Ortega
México	Dr. Enrique Muñoz Goncen
Nicaragua	Ing. Noel Ramírez
Panamá	Félix Sánchez
Paraguay	Cnel. SG Ing. Arturo Aquino
Perú	Tcnl. EP Reynaldo Flores Rivero
Rep. Dominicana	Agrim. Rafael Santiago Hernández Batista
Uruguay	Dr. Carlos López
Venezuela	

REVISTA  
**cartográfica**

número 106 • enero-junio 2023



INSTITUTO PANAMERICANO DE  
**GEOGRAFÍA E HISTORIA**

# REVISTA cartográfica

Publicación anual fundada en 1952. Desde 2016 publicación semestral  
Indizada en Latindex, DIAJ y SciELO

Disponible en: PERIÓDICA, Cengage Learning, Ebsco y ProQuest  
<https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/Indexada>

La preparación de la *Revista Cartográfica* está a cargo de la editora  
Dra. María Ester Gonzalez  
Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía  
Universidad de Concepción  
Victoria 486-490, CP 4030000, Concepción, Chile  
Correo electrónico: [editor\\_revista\\_cartografica@ipgh.org](mailto:editor_revista_cartografica@ipgh.org)  
[www.revistasipgh.org/index.php/rcar](http://www.revistasipgh.org/index.php/rcar)

## Comité Editorial

*Dr. Adolfo Quesada-Román*, Universidad de Costa Rica (Costa Rica)  
*Dr. Carlos Granell Canut*, Universidad Jaume I de Castellón (España)  
*Dr. Carlos López Vázquez*, Universidad ORT Uruguay (Uruguay)  
*Dra. Daniela Ballari*, Universidad de Azuay (Ecuador)  
*Dr. Francisco Javier Ariza López*, Universidad de Jaén (España)  
*Dr. Francisco de la Barrera*, Universidad de Concepción (Chile)  
*Dr. Jean Francois Mas*, Universidad Nacional Autónoma de México (México)  
*Dr. Joep Crompvoets*, KU Leuven Public Governance Institute (Bélgica)  
*Dr. Miguel Ángel Bernabé Poveda*, Universidad Nacional de Catamarca (Argentina)  
*Dra. Montserrat Gómez Delgado*, Universidad de Alcalá (España)  
*Dr. Sandra Staller Vázquez*, Universidad Politécnica de Madrid (España)  
*Dr. Theofilos Toulkeridis*, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE (Ecuador)

Canje, venta y distribución, escribir a:  
Instituto Panamericano de Geografía e Historia  
Secretaría General  
Apartado Postal 18879, C.P. 11870 Ciudad de México, México  
Teléfonos: (52-55)5277-5888, 5277-5791 y 5515-1910  
Correo electrónico: [publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org) | <https://revistasipgh.org/> | <http://www.ipgh.org>

Las opiniones expresadas en notas, informaciones, reseñas y trabajos publicados en la *Revista Cartográfica*, son de la exclusiva responsabilidad de sus respectivos autores. Los originales que aparecen sin firma ni indicación de procedencia son de la Dirección de la Revista.

En cumplimiento con la resolución IX de la XIV Reunión del Consejo Directivo del IPGH (Buenos Aires, Argentina, julio, 1972.), se advierte que: "Los límites que aparecen en los mapas de esta publicación no están, en algunos casos, finalmente determinados y su reproducción no significa aprobación oficial o aceptación por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH)".



**Diseño de portada / Cover design:** Santiago Mora Van Cauwelaert - Taller Siranda.

**Fuente de la imagen / Source:** Reinterpretación vista aérea de La Paz (Bolivia), basada en imagen de satélite Bing (2020) y modelo digital de elevación NASA JPL (2021)

© 2022 Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

*Revista Cartográfica*, núm. 106, enero-junio 2023, publicación semestral editada por el Instituto Panamericano de Geografía e Historia, Ex-arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México. Tels. (52-55)5277-5888, 5277-5791, 5515-1910, [www.ipgh.org](http://www.ipgh.org), <https://revistasipgh.org/> | [publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org) | Editora: María Ester Gonzalez, correo electrónico: [editor\\_revista\\_cartografica@ipgh.org](mailto:editor_revista_cartografica@ipgh.org). | Reserva de Derechos al Uso Exclusivo núm. 04-2015-090212390600-203, otorgado por el Instituto Nacional del Derecho de Autor | ISSN (en línea) 2663-3981 | Licitud de título y contenido: en trámite | Responsable de la última actualización de este número: Departamento de Comunicación Social del IPGH, Ex arzobispado núm. 29, Col. Observatorio, Alcaldía Miguel Hidalgo, C.P. 11860, Ciudad de México, México. Última fecha de actualización: 13 de diciembre de 2022.

Se autoriza cualquier reproducción parcial o total de los contenidos o imágenes de la publicación, incluido el almacenamiento electrónico, siempre y cuando sea para usos estrictamente académicos y sin fines de lucro, citando la fuente sin alteración del contenido y otorgando los créditos autorales.

# REVISTA cartográfica

número 106

enero-junio 2023

---

## CONTENIDO

### Artículos

**Diseño y creación de una herramienta geotecnológica para el análisis de la accidentalidad vial en la Ciudad de Toluca, México, SIGESEV-TC**

*Design and creation of a geotechnological tool for the analysis of road accidents in the City of Toluca, Mexico, SIGESEV-TC*

José Miguel Muñoz  
Raquel Hinojosa

7

**Dendrogeomorphology as a tool to depict hydrogeomorphic processes in the tropics**

*La dendrogeomorfología como una herramienta para representar procesos hidrogeomorfológicos en los trópicos*

Adolfo Quesada-Roman

35

**Relaciones entre la estructura urbana y la movilidad cotidiana en Ciudad Juárez, Chihuahua, México**

*Relations between urban structure and daily mobility in Ciudad Juarez, Chihuahua, Mexico*

Isaac Chaparro Hernández

53

**Analyzing Segregation of Informal Residents in Latin American Cities' Periphery Using Remote Sensing**

*Analizando la segregación de los asentamientos informales en la periferia de las ciudades latinoamericanas usando imágenes satelitales*

Sonia Morales

77

**Análisis espaciotemporal del proceso de pérdida forestal en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Michoacán, México**

*Spatio-temporal analysis of the process of forest loss in the municipalities of Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro and Zinapécuaro. Michoacan, Mexico*

Araceli Benítez Franco

99

**Los nuevos corredores en altura en la Ciudad de México.  
Análisis de su proceso, aplicación y visualización en un  
Sistema de Información Geográfica**

*The new corridors in height in Mexico-City. Analysis of its process,  
application and visualization in a Geographic Information System*

Víctor Hugo Aquino Illescas

**125**

**A Cartografia Histórica de Petrópolis e uma análise  
geográfica sincrônica para o século XIX (1846-1861)**

*The Historical Cartography of Petrópolis and a Synchronic  
Geographic Analysis for the 19th Century (1846-1861)*

Tainá Laeta

Manoel do Couto Fernandes

Mário Gonçalves Fernandes

**147**

**Reseñas**

**Ráster con Terra. Esto va de Filas, Columnas, Cotas y Píxeles**

Patricio Lamperein Polo

**171**

**Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento**

Jean-François Mas

**173**

**Definición de la Revista**

**177**

**Normas para Autores**

**178**

# ARTÍCULOS





# Diseño y creación de una herramienta geotecnológica para el análisis de la accidentalidad vial en la Ciudad de Toluca, México, SIGESEV-TC

Design and creation of a geotechnological tool for the analysis of road accidents in the City of Toluca, Mexico, SIGESEV-TC

José Miguel Muñoz<sup>1</sup>

Raquel Hinojosa<sup>2</sup>

*Recibido 8 de agosto de 2022; aceptado 24 de septiembre de 2022*

## RESUMEN

Un sistema de información geográfica (SIG) es un instrumento elemental para la gestión de la seguridad vial. La implementación de metodologías que permita a las unidades de planificación estratégica mejorar, genera que el problema de accidentalidad vial que sufren las ciudades del mundo pueda ser reducido considerablemente a través del análisis de variables físicas, económicas, espaciales y sociales de las metrópolis. Por ello, en este artículo se utilizan herramientas geo informáticas de uso libre que apoyan en esta gestión. La revisión metodológica se materializa en el SIGESEV-TC: un portal geográfico, estadístico y de consulta para la gestión de la seguridad vial en Toluca, la capital del Estado de México, donde es posible almacenar, visualizar y gestionar geográfica y estadísticamente los accidentes de tránsito que han ocurrido en la ciudad. Este proyecto se convierte en el primer SIG de gestión en seguridad vial para la ciudad de Toluca.

Palabras clave: *SIG, seguridad vial, accidentes de tránsito, software libre, geotecnología.*

<sup>1</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, México, correo electrónico: [jmunoz007@alumno.uaemex.mx](mailto:jmunoz007@alumno.uaemex.mx). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1819-7035>

<sup>2</sup> Universidad Autónoma del Estado de México, México, correo electrónico: [rhinojosar@uaemex.mx](mailto:rhinojosar@uaemex.mx). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6511-0759>

## ABSTRACT

A geographic information system (GIS) is an elementary tool for road safety management. The implementation of methodologies that allow strategic planning units to improve the road accident problem suffered by the world's cities can be considerably reduced through the analysis of physical, economic, spatial and social variables of the metropolis. For this reason, this article uses free geoinformatics tools that support this management. The methodological review is materialized in the SIGESEV-TC: a geographic, statistical and consulting portal for the management of road safety in Toluca, the capital of the State of Mexico, where it is possible to store, visualize and manage geographically and statistically the traffic accidents that have occurred in the city. This project becomes the first road safety management GIS for the city of Toluca.

Key words: *GIS, road safety, traffic accidents, free software, geotechnology.*

## 1. Introducción

Un sistema de transporte es un componente esencial para el desarrollo socioeconómico de cualquier región; incrementa las interconexiones de individuos para aumentar los beneficios en diversos sectores económicos; aporta las bases para la producción con la reducción de gastos, debido a que proporciona fácilmente la adquisición de materia prima, recursos financieros y mano de obra. A nivel social, se promueve la igualdad y el mejoramiento de las condiciones de vida de las personas, posibilitando la unificación de las urbes, generando movilidad y accesibilidad a mayor medida (Zaragoza & Islas, 2017).

Por encima de todas las ventajas que un sistema de transporte ofrece, también conlleva la existencia de dificultades o problemáticas, como los accidentes de tránsito, que pueden ocasionar lesiones, discapacidades, pérdidas económicas, daños socioemocionales y hasta la muerte. Cada año, los choques originados por el tránsito causan la muerte de aproximadamente 1.3 millones de personas y cuestan a la mayoría de los países 3% de su producto interno bruto (PIB); en los países de bajos ingresos se encuentra alrededor de 60% del parque vehicular mundial, pero se producen más de 93% de fallecimientos relacionados con accidentes de tránsito (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021). De acuerdo con las investigaciones realizadas por el Instituto Nacional de Salud Pública (INSP), México es el séptimo país a nivel mundial con muertes en carreteras y el tercero en Latinoamérica, con 22 muertes en personas de 15 a 29 años al día y 24 mil fallecimientos en promedio al año; según la Organización Panamericana de la Salud (OPS), esto genera que 40 mil personas resulten con discapacidad de por vida y más de 750 mil queden gravemente heridas. Debido a este problema de salud pública, el estudio de siniestralidad vial dentro de la administración y planeación de seguridad vial en un departamento de tránsito y movilidad se convierte en una prioridad, con el objetivo de mitigar y prevenir las múltiples muertes y pérdidas económicas que genera un accidente de tránsito (INSP, 2020).

Diversas organizaciones y centros de investigación en el mundo han dedicado sus esfuerzos a estudiar la gestión de seguridad vial a nivel mundial, para implementar metodologías que ayuden a la prevención y reducción de muertes y lesiones que genera un accidente de tránsito. La Norma Internacional ISO 39001, Sistemas de Gestión de la Seguridad Vial, Requisitos y Recomendaciones de Buenas Prácticas afirma que la seguridad vial es un tema de inquietud a nivel mundial, debido a las múltiples muertes que genera un accidente de tránsito. De ahí que esta norma permita a las entidades gubernamentales reducir, prevenir y eliminar la ocurrencia y riesgo de las muertes y heridas en un accidente de tránsito; además, plantea llevar a cabo acciones para tratar los riesgos y oportunidades que aseguran el sistema de seguridad vial, donde se deben de reconocer los factores de desempeño, con el fin de tener información documentada para crear y actualizar los datos de accidentalidad vial, y preservar y disponer con total rigurosidad (ISO, 2012).

La investigación de siniestralidad vial es objeto de análisis en el mundo desde hace más de 20 años. En 2016, Sergio Galán, Elia Quirós y Pedro Rodríguez analizaron las posibles aplicaciones de los sistemas de información geográfica en las carreteras de la comunidad autónoma española de Extremadura con mayor siniestralidad; georreferenciaron los accidentes viales entre 2010 y 2015; relacionaron los eventos con otros tipos de variables visuales que permiten múltiples análisis para el mejoramiento de la seguridad vial en la región, por medio de la generación de mapas de siniestralidad vial, mapa de intensidad media diaria de tráfico, mapa de pendientes-siniestralidad y mapa de IMD-siniestralidad-población. El estudio concluye que junto a la georreferenciación de la accidentalidad y los SIG es posible realizar todo tipo de relaciones para lograr el estudio desde múltiples puntos de vista (Nieto Masot *et al.*, 2016).

En la ciudad de Bogotá D. C. se cuenta con el Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbana Regional (Simur), el cual facilita la comunicación y el intercambio de información entre los peatones, ciclistas, pasajeros y conductores con los componentes de la movilidad (infraestructura, vehículos y empresas). En este sistema es posible visualizar gráficas y mapas de rutas para automóviles, transporte público y conveniente, calidad de servicio y seguridad. Esta herramienta cuenta con un apartado de seguridad vial, donde se encuentra un visor en tiempo real, que se complementa con la plataforma Waze para presentar los accidentes que están ocurriendo en la capital colombiana (Alcaldía Mayor de Bogotá D. C., 2021).

En la ciudad de Medellín existe GeoMedellín- Portal Geográfico del Municipio de Medellín, el cual contiene información de seguridad vial y desarrolla siete temas: salud y seguridad; ordenamiento territorial; movilidad; medio ambiente y hábitat; infraestructura y catastro; educación, cultura y recreación, y desarrollo económico y población. También se encuentran disponibles datos abiertos de fácil descarga, con el uso de los visores geográficos. En materia de seguridad vial, se cuenta con la sección titulada "Caracterización de los incidentes viales

desde el año 2014”, que detalla de manera precisa y eficaz —por medio de tres tableros de control— la información concerniente a los accidentes de tránsito ocurridos en la ciudad, a través de variables como el número de accidentes, de muertos o heridos, gravedad, condición y caracterización de las víctimas, y fecha del suceso (Alcaldía de Medellín, 2021).

En Brasil, Denise Martins Chagas, de la Universidad Federal do Rio Grande do Sul, propone “Herramientas para el reconocimiento de los factores que causan los accidentes de tráfico: estudio de caso en Brasil” (2014), en el que detalla una forma idónea para la captura de datos, con el objetivo de unificar y relacionar los elementos que interactúan con un accidente de tránsito. Se describe una normalización en la recolección y tratamiento de datos estadísticos que genera la posibilidad de crear mapas de localización de reincidencia en accidentalidad vial, para identificar los “puntos críticos” e implementar medidas para disminuir la siniestralidad en distintas zonas. Los formularios propuestos fueron usados por BHTRANS, agencia responsable de tránsito en la ciudad de Belo Horizonte, Brasil (Chagas, 2014).

En Ciudad de México, en 2007, el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), a través de Geotecnología en Infraestructura, Transporte y Sustentabilidad (GITS), genera el “Sistema de Información Geográfica para la atención y prevención de accidentes de tránsito en el Distrito Federal”, que consiste en el diseño y construcción de un SIG de escritorio que integra datos e información entre 2005 y 2007, para el diagnóstico de la seguridad vial en Ciudad de México. Cuenta con ocho líneas de análisis: información básica; marco físico geográfico; marco social; marco económico; proyectos viales; series de accidentalidad municipal; diagnóstico de accidentes de tránsito a escala de intersección vial, y modelos para el análisis espacial de los accidentes. Es uno de los primeros SIG desarrollados para el estudio de la accidentalidad vial en Latinoamérica (GITS, 2020). La unidad GITS cuenta con la línea de investigación en la geografía de la seguridad vial, con enfoques territoriales de múltiples factores y temporalidad para lograr solucionar la problemática de estudio, con el objetivo de mejorar la movilidad en las vías terrestres de México y así evitar pérdidas económicas y humanas que generan los accidentes de tránsito. GITS ha desarrollado las siguientes investigaciones en materia de seguridad vial: diagnóstico de los accidentes de tránsito en el Distrito Federal, 2007; diagnóstico de los accidentes de tránsito en cuatro Zonas Metropolitanas de México, 2008; sistema de información para la atención y prevención de accidentes de tránsito en el Distrito Federal, y Diagnóstico espacial de accidentes de tránsito en el municipio de León Guanajuato 2010-2013 (GITS, 2020). Dichos estudios ponen en evidencia la pertinencia trascendental de sistemas integrados para el manejo de datos de siniestros viales en las urbes, con la finalidad de mejorar la seguridad vial.

Los datos y la información que generan los accidentes de tránsito son registros espaciales, que puntualmente detallan la posición y la información

externa e interna que caracteriza un siniestro vial. Con el objetivo de conservar y actualizar los datos, para planear, gestionar e implementar medidas de aseguramiento y prevención de cualquier problemática en una ciudad, se crearon los sistemas de información geográfica, que, junto con la aplicación de herramientas geotecnológicas, se convierten en poderosos instrumentos para la gestión de la información. Las virtudes atribuidas al transporte por la utilización de los SIG, se vinculan con tres funciones fundamentales: análisis geográfico de la información, despliegue y representación espacial de la misma, e integración de los datos. De esta manera, la particularidad unificadora —vinculada al acopio de información originaria de múltiples fuentes (mapas, documentos, registro automatizado, sensores remotos, etcétera)— facilita la conexión entre series de datos distintas tanto locacionales y temporales, lo cual permite relacionar y estudiar la información determinada en el sector transporte con otra de carácter alterno (social, medioambiental, económica, etcétera), para analizar sus demostraciones territoriales (Backhoff Pohls & Vázquez Paulino, 2002).

El proceso de gestión de la seguridad vial es un aspecto que cada organización encargada de la movilidad de una ciudad debe estudiar exhaustivamente, con el fin de lograr disminuir las pérdidas humanas y económicas que un accidente o siniestro vial produce. Según esto, la ciudad de Toluca, no cuenta con un sistema sólido e integrado para la gestión de la seguridad vial, por lo que los datos que captura la dirección de movilidad no se encuentran en una base de datos robusta, y tampoco se realiza el debido análisis de la información en algún sistema tecnológico (Galicia, 2021). Por ello, en el presente artículo se revisan las metodologías y sistemas geográficos que diversas metrópolis utilizan para la gestión de su seguridad vial, con el objetivo de establecer un conjunto de herramientas geotecnológicas útiles para analizar y visualizar los índices de accidentalidad vial, y de este modo, construir un sistema geográfico, de captura y de almacenamiento de datos, que sirva como mecanismo para la toma de decisiones en la entidad gubernamental correspondiente, para mitigar y prevenir los siniestros viales de la capital del Estado de México, lo que permitirá analizar geográfica y estadísticamente los accidentes viales de los últimos 20 años, para que con esto se pueda estudiar localmente la problemática vial que tiene la ciudad en sus aspectos territoriales, sociales y de infraestructura.

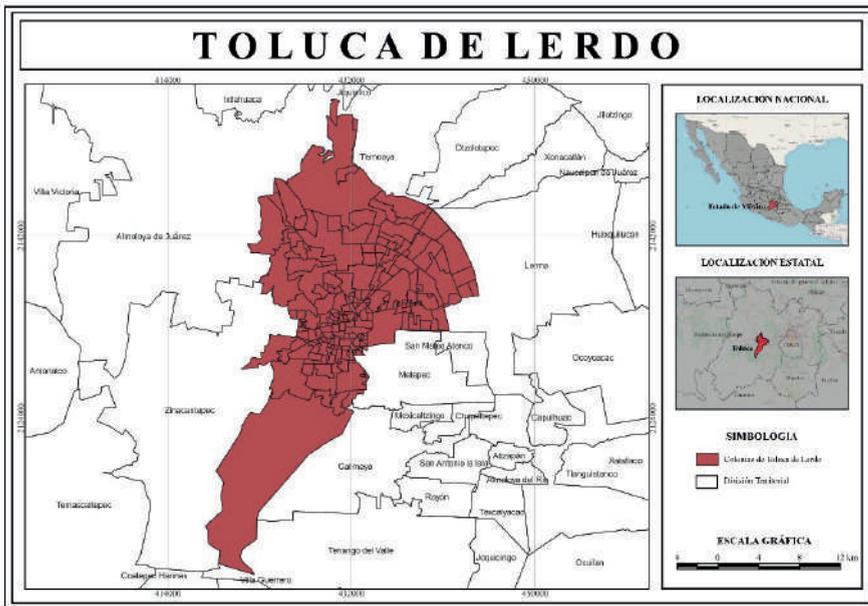
## **2. Materiales y Métodos**

### **2.1 Zona de estudio**

La capital del Estado de México es la ciudad de Toluca de Lerdo. Ésta se encuentra a 40 km al oeste de la Ciudad de México, con un área total de 420 km<sup>2</sup>. A nivel territorial, el municipio cuenta con 85 circunscripciones territoriales divididas en 47 delegaciones, 38 subdelegaciones y 280 unidades territoriales (Figura 1). Forma parte de la quinta zona metropolitana más importante de la República

mexicana y está incluida dentro de las 364 ciudades del Sistema Nacional Urbano.

En las últimas décadas, Toluca ha vivido un acelerado proceso de metropolización. Su configuración como área metropolitana se inició a partir de los años sesenta gracias a la industrialización del corredor Toluca-Lerma, lo que originó cambios de suprema importancia en las actividades económicas y sociales de la ciudad y, por ende, produjo que municipios vecinos se incorporaran al desarrollo socioeconómico de la creciente metrópolis (Hinojosa, 2017). Para 2020, la población en Toluca es aproximadamente de 910 608 habitantes (51.8% mujeres y 48.2% hombres). En los Estados Unidos Mexicanos existen áreas y zonas productoras, donde se localizan los parques industriales —caracterizados por operar de manera óptima—, las empresas de manufactura y logística. En 2020, Toluca registró ocho parques industriales con Servicios de Alojamiento Temporal y de Preparación de Alimentos y Bebidas (5.167%), comercio al por menor (22.029%), otros servicios excepto actividades gubernamentales (6.865%). Por esta razón, la capital del Estado de México es una de las zonas industriales más importantes del país (SE y Datawheel, 2020).



**Figura 1.** Municipio de Toluca.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020).

## 2.2 Datos espaciales

La adquisición de datos es el área primordial para la construcción de una herramienta geotecnológica. Para el presente proyecto, la principal fuente de suministro de información es la del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Las capas espaciales y bases de datos son las más actualizadas y están reproyectadas al sistema WGS84/UTM ZONA 14N y fueron tratadas con herramientas de geoprocésamiento que permiten cortar, disolver, delimitar o unir capas geográficas, según la necesidad de la investigación. Se determinaron los factores que relacionan un accidente de tránsito, pues con el análisis del entorno físico es posible reconocer si el accidente fue generado por la precaria red vial, por la falta de señalización o por objetos que interrumpen el flujo libre de los vehículos. Otro factor importante son las consecuencias que provoca un accidente vial, en un espacio determinado que relaciona áreas socioeconómicas que se pueden ver perjudicadas por un siniestro vial. También, con información poblacional se pueden conocer las tasas de vulnerabilidad demográfica. En la Tabla 1 se visualizan las capas geográficas estrechamente relacionadas con un accidente de tránsito, para identificar su causa o reconocer los elementos espaciales que lo relacionan: accidentalidad vial; infraestructura vial y de transporte; unidades territoriales; demografía y población; topografía, e infraestructura urbana. En esta tabla también se aprecia la fuente de los datos y el grupo al que pertenecen dentro del sistema.

**Tabla 1.** Capas geográficas que componen SIGESEV-TC

<i>Capas geográficas SIGESEV-TC</i>			
<i>Grupo</i>	<i>Capas geográficas</i>	<i>Fuente</i>	<i>Año</i>
1	Accidentalidad vial	Dirección de seguridad vial y de tránsito de la ciudad de Toluca	2000-2019
2	Infraestructura vial y transporte	Red vial	Instituto Mexicano del Transporte
		Restricción peatonal o vehicular	INEGI
		Pasos a desnivel	INEGI
		Vía férrea	INEGI
		Caminos	INEGI
		Glorietas	INEGI
		Puentes	INEGI

<i>Capas geográficas SIGESEV-TC</i>				
<i>Grupo</i>	<i>Capas geográficas</i>	<i>Fuente</i>	<i>Año</i>	
3	Unidades territoriales	Ageb urbana	INEGI	2020
		Ageb rural	INEGI	2020
		Códigos postales	INEGI	2020
		Colonias	INEGI	2021
		Localidades	INEGI	2020
		Manzanas	INEGI	2020
		Usos del suelo	INEGI	2020
4	Demografía y población	Población	INEGI	2020
5	Topografía	Curvas de nivel	CEM	2020
		Pendientes	CEM con procesamiento propio	2020
		Mapa de sombras	CEM con procesamiento propio	2020
6	Infraestructura urbana	Estaciones de policía	Google Maps	2021
		Cementerios	SIPAT	2006
		Venta de alcohol	Google Maps	2021
		Bases de taxis	SIPAT	2006
		Bancos	SIPAT	2006
		Iglesias	SIPAT	2006
		Hospitales	SIPAT	2006
		Estacionamientos	SIPAT	2006
		Escuelas	SIPAT	2006
		Centros comerciales	SIPAT	2006
		Parquímetros	SIPAT	2006
		Mercados	SIPAT	2006
		Áreas de importancia	INEGI	2020
Corrientes de agua	INEGI	2020		

**Fuente:** elaboración propia.

## 2.3 Construcción metodológica

Para la construcción, implementación y diseño del Sistema Integrado de Información Geográfica en Seguridad Vial de la ciudad de Toluca (SIGESEV-TC) es necesario determinar los elementos que se deben considerar para que sea un sistema capaz de gestionar la seguridad vial en una ciudad de manera óptima. Para ello, se realiza una revisión literaria exhaustiva que define los componentes necesarios para la creación de un sistema completo para el estudio de la accidentalidad en una urbe geográfica. En primera medida se tiene la captura, revisión y almacenamiento de datos que, según Denise Martins Chagas (2014), se deben capturar cuando sucede un accidente de tránsito, al igual que la estandarización en su revisión y almacenamiento en una base de datos lo suficientemente robusta y consolidada.

La segunda y tercera parte se determinan por la visualización geográfica y la visualización estadística, elementos que comparte la mayoría de sistemas de gestión en seguridad vial, como el Sistema de Información Geográfica para la atención y prevención de accidentes de tránsito en el Distrito Federal (GITS, 2020), el Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbana Regional (SIMUR), de Bogotá D. C. (Alcaldía Mayor de Bogotá D. C., 2021) y GeoMedellín-Portal Geográfico del Municipio de Medellín (Alcaldía de Medellín, 2021).

El cuarto componente es el sistema de consulta. Emmanuel Galicia, junto con la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), realiza el proyecto denominado "Prototipo de sistema de consulta de accidentes viales para los tomadores de decisiones orientados a la seguridad vial en el ayuntamiento del municipio de Toluca, Estado de México", a través del cual propone un prototipo de consulta de accidentes viales ocurridos entre 2017 y 2019, y está dirigido al departamento de tránsito vial del municipio de Toluca. En este sistema es posible capturar información espacial y características de los sucesos ocurridos, para lograr la integración, almacenamiento y manipulación de los datos espaciales en PostgreSQL, donde se obtiene una herramienta capaz de integrar la información de manera estandarizada, clasificada y categorizada (Galicia, 2021).

Según la anterior revisión de sistemas tecnológicos que grandes ciudades de latinoamérica implementan para la gestión de su seguridad vial, no se determina cual es el mejor debido a que cada una de ellas tienen características específicas que hace un sistema único y particular, por lo que de acuerdo a los objetivos del presente estudio, se definen las cuatro áreas que en común y de suma importancia tienen los sistemas estudiados para la debida gestión de la seguridad vial en una ciudad: (1) Captura, revisión y almacenamiento de datos, (2) visualización geográfica, (3) visualización estadística y (4) sistema de consulta, con la característica fundamental de usar *software libre*, por la autonomía y libertad en la construcción de los componentes del sistema. A continuación se detallan estas áreas de estudio en el desarrollo y creación del Sistema Integrado de Información Geográfica en Seguridad Vial de la Ciudad de Toluca, SIGESEV-TC.

### 2.3.1 Uso de software libre

El término *software libre* se refiere a la autonomía que tienen los usuarios para ejecutar, copiar, distribuir, estudiar, cambiar y mejorar el *software*. Está determinado por cuatro clases de libertad: libertad de operar el programa sea cual sea el propósito; libertad para estudiar el funcionamiento del programa para adaptarlo a las necesidades del usuario; libertad de redistribuir copias para cooperar en la ayuda a terceros, y libertad para mejorar el programa y compartir los resultados obtenidos. Lo anterior se realiza debido al acceso que el usuario tiene con el código fuente del programa, por lo que se convierte en la herramienta fundamental para lograr manipular el software de manera adecuada (Stallman, 2015).

Al considerar el software libre se detalla que existe la posibilidad de usar un programa sin tener que costear la copia. Los usuarios del *software* libre tienen la libertad de distribuirlo, estudiarlo, modificarlo, ejecutarlo y mejorarlo, con base en una política denominada GNU, que establece los tipos de licencia según los requerimientos que necesita el usuario (Rodríguez-Dueñas, 2014; Stallman, 2015).

Para la presente investigación y elaboración del SIGESEV-TC, se utiliza el *software* libre, por sus múltiples ventajas.

## 2.4 Captura, revisión y almacenamiento de datos

Los accidentes de tránsito ocurren en un espacio determinado de la vialidad de una ciudad, por lo que tienen la connotación geoespacial, es decir, se caracterizan por ser entidades espacio-temporales que contienen: posición relativa: frente a otros elementos del entorno; posición absoluta: sobre un sistema de coordenadas (x, y, z); atributos que lo describen: características del elemento o fenómeno, y figura geométrica que lo representa: punto, línea, polígono (López & Torres, 2015). Estas características permiten considerar los aspectos de calidad que rigen los datos geoespaciales en términos de accesibilidad, integridad, precisión, actualidad y consistencia. Las entidades que suministran la información geoespacial son las encargadas de velar por la calidad y transparencia de los datos que se comparten, y deben cumplir al menos con los estándares establecidos en la ISO 19157 (ISO, 2013) o con los que rige cada organización.

A nivel local, es primordial determinar la información que se va a capturar en un accidente de tránsito según las necesidades de la entidad gubernamental. En la captura de datos se deben considerar cuatro áreas básicas: información espacio-tiempo del accidente, información de los vehículos involucrados, información de las personas involucradas y descripción del accidente (Chagas, 2014). Para llevar a cabo esta tarea se requiere de un equipo especializado; por ejemplo, la elaboración de un formulario debidamente estructurado y legible para cualquier persona que lo va a utilizar en una aplicación móvil. Ésta es una

herramienta diseñada para desarrollar una función específica en una plataforma concreta: móvil, tablet, tv o pc, y proporciona nuevas formas de comunicación e interacción para la obtención de información (Briz-Ponce *et al.*, 2015). Además, permite integrar el formulario que *a priori* se realizó de forma manual, pero con la diferencia de que la app seleccionada pueda capturar coordenadas en tiempo real, ya sea *online* u *offline*, y así conocer las coordenadas geográficas del lugar. Algunas de las aplicaciones gratuitas útiles para cumplir con este objetivo son gvSIG Mobile, KoboToolBox, Open Data Kit (ODK), CartoDruid y Qgis, con la extensión de QField. Para el presente sistema se usa KoboToolBox, pues permite la edición del formulario con XLSForm o diseñar un formulario de manera estructural, que sea capaz de capturar la información del accidente de tránsito y los elementos que interactúan con éste, es decir, víctimas, vehículos y contexto espacial de manera relacional.

Después de que los datos son capturados, descargados, revisados, depurados y organizados hay que almacenarlos en un sistema gestor de bases de datos (SGBD), que cumple tres requisitos básicos: no redundancia: datos almacenados una sola vez; independencia: los datos se organizan de una manera estructurada, y concurrencia: varios usuarios pueden acceder simultáneamente a los datos (RIPOLL, 2008). El modelo más utilizado es la base de datos relacional, el cual consiste en un conjunto de tablas formadas por filas (registros) y columnas (campos), y comparten algún campo entre ellas, que sirve para establecer relaciones y generar consultas complejas (Alonso Sarria, 2014). Algunos de los softwares libres de SGBD son: PostgreSQL, MySQL y SQLite. En este proyecto se usa PostgreSQL, por su robustez, confiabilidad y rendimiento.

Luego de conocer la forma de captura de datos y su estructura en un SGBD, los datos se convierten en información y conocimiento por medio de la visualización geográfica y estadística, y así se estudian los patrones de ocurrencia de la siniestralidad vial de la ciudad.

## 2.5 Visualización geográfica

El desarrollo de las tecnologías de la información tiene una importante influencia en la cartografía, contribuyen al surgimiento de modelos de comunicación geográfica de nuevo aprendizaje. La visualización geográfica es uno de los paradigmas que, con el uso de nuevas tecnologías, amplían la importancia de los mapas como herramienta poderosa de comprensión de los fenómenos espaciales (Bosque Sendra & Zamora Ludovic, 2002). La parte fundamental de la visualización geográfica es el aplicativo cliente-servidor que hace posible navegar sobre datos continuos y tridimensionales del territorio, para realizar consultas y explotación de los datos espaciales (Galileo Ingeniería y Servicios, 2011). La representación de un análisis en un espacio SIG, las bases de datos de calidad y el estudio de indicadores conllevan al reconocimiento de modelos territoriales, socioeconómicos y geodemográficos, que no son identificables fácilmente con información estadística; de ahí la importancia de representar

la información espacial para la gestión urbana y territorial. Utilizar variables geográficas adecuadas ayuda a transmitir e identificar con éxito la problemática de estudio en un espacio determinado (Postigo *et al.*, 2013).

Trabajar con herramientas geográficas que propician el desarrollo de nuevas iniciativas, ideas y proyectos, para la evaluación de relaciones en los protagonistas de un sistema urbano, hace que a través de un geovisualizador, junto a variables socioeconómicas y ambientales, se tenga acceso a los importantes cambios y patrones que las municipalidades puedan identificar para elaborar y diagnosticar políticas y planes que optimicen la problemática en cuestión (Postigo *et al.*, 2013). Los visualizadores libres de más relevancia y útiles para la realización de este tipo de cartografía en una zona determinada son: gvSIG Online, Carto, GeoRED e Instamos. Aquí se optó por el gvSIG Online, porque se puede activar un campo temporal que facilita la visualización de los accidentes de tránsito en series animadas de tiempo; asimismo, junto con la edición cartográfica a partir de código SLD, se generan mapas de calor que optimizan el análisis de este fenómeno.

## 2.6 Visualización estadística

La visualización estadística está dada por el uso de *dashboards* digitales, herramienta que reconoce y establece los indicadores claves para analizar los factores más importantes en la toma de medidas y decisiones, que permitan obtener resultados óptimos en pro de asegurar un buen desarrollo (Calle Paz & Valles Coral, 2021). Un *dashboard* es una herramienta que representa visualmente la información más relevante y necesaria de manera organizada y consolidada para el cumplimiento de los objetivos propuestos. Su función principal es diagnosticar de manera óptima un problema, para agilizar la toma de decisiones, mediante la evaluación y seguimiento periódico de indicadores y patrones que facilitan a las entidades públicas y privadas analizar el entorno real de su espacio (Morales, 2021).

Los elementos generales de un *dashboard* son fundamentales para la elaboración de un buen producto. Primero se tiene el reporte, que muestra la información clave para el diagnóstico, de esta manera la temporalidad que da a conocer el periodo de toma de la información. Segundo, la apertura muestra la forma en que se despliegan los contenidos para la clasificación de la información, para ello se debe tener en cuenta la frecuencia de actualización, ya sea diaria, semanal o mensual. Tercero, los gráficos son los elementos más importantes, porque son la visualización gráfica de los indicadores (diagramas de barras, pastel o líneas) (Robalino, 2017). Las aplicaciones gratuitas más usadas para la elaboración de *dashboards* son: Google DataStudio, Tableau Public y Dashboards de QGIS. En este proyecto se emplea Tableau Public, por su facilidad de manejo y edición; además, favorece la conexión con PostgreSQL, por lo que la base de datos generada sirve a Tableau para mantener el *dashboard* actualizado.

## 2.7 Sistema de consulta

La información que es capturada y visualizada geográfica y estadísticamente es primordial que se pueda consultar y descargar para la elaboración de análisis externos al sistema. Existe la plataforma útil para la consulta de una base de datos web, cuya funcionalidad es establecer interacción entre personas que investigan información del tema relacionado (Falgueras, 2014). Este sistema se realiza por medio de una página de consulta, cuyo objetivo es recuperar la información almacenada en la base de datos. Se recomienda proporcionar al usuario los diferentes tipos de búsqueda, que van desde una consulta simple o básica, avanzada o combinada, hasta la consulta de los índices y el acceso por categoría temática. Los elementos básicos para esta página de consulta radican en la identificación y especificación de la base de datos, la acotación de la búsqueda a un campo o conjunto de ellos, la visualización de los índices, información breve para ayudar en la consulta, la elección de la forma de presentación de los resultados y del ordenamiento de los datos, botones para la ejecución de acciones, un historial de búsquedas, navegación entre páginas de interfaz, y datos que identifiquen y filtren la información por fecha, hora y tipología. Los resultados son una lista que contiene la información solicitada para presentar al usuario una visión global de lo que desea encontrar en el sistema (Falgueras, 2014).

## 2.8 Herramientas auxiliares para el procesamiento de datos

Los datos capturados en un accidente de tránsito son localizables, de ahí la importancia de proporcionar una base de datos rápida y potente para realizar consultas espaciales y alfanuméricas. Esta labor la cumple PostGIS, donde los datos espaciales se cargan mediante el uso de asistentes gráficos incluidos en la aplicación, para su posterior visualización en un software GIS de escritorio o remoto. De esta manera es útil la interfaz web de Geo Server, un servidor de mapas que provee acceso a fuentes de datos SIG y mapas cartográficos de calidad mediante estándares web (Sánchez *et al.*, 2013). Por medio de estas dos herramientas es posible la conexión interactiva con el visualizador geográfico, lo que facilita y automatiza la carga de información a la base de datos, para que los mapas se actualicen periódicamente de forma rápida y oportuna.

Es fundamental evaluar las herramientas complementarias para el tratamiento de los datos capturados en campo, y de esta manera lograr la interacción y conexión segura con todos los servicios que ofrece el sistema. Si es el caso, es vital desarrollar macros que automaticen los procedimientos que repetitivamente se realizan, con el fin de que la información se encuentre organizada y apta para facilitar la carga a la base de datos correspondiente.

## 2.9 Implementación y unión del sistema

El sistema debe contar con una arquitectura tecnológica, para definir la estructura, comportamiento, gobernabilidad y relaciones entre el software,

hardware, datos, redes, ecosistema e interacción humana que rodea los distintos procesos de negocios. Es posible visualizar esta representación por las capas de información que contiene el entorno tecnológico que se desarrolla (Thompson, 2016). Los requerimientos del sistema se conocen como funcionales y no funcionales. Los funcionales declaran los servicios que presta el sistema y la forma en que éste reacciona ante determinados insumos (define la interacción con otros elementos informáticos, las respuestas automáticas y los procesos predefinidos). Los no funcionales caracterizan lo que el sistema no debe realizar (determina las propiedades del sistema en su rendimiento, seguridad y disponibilidad) y definen las restricciones del sistema y la representación de los datos utilizados en su interfaz, los cuales se generan por la necesidad del usuario debido a la interoperación con otros sistemas de software o por factores de seguridad y privacidad (Wong Durand, 2017).

El servicio Word Wide Web es un sistema distribuido por internet basado en la tecnología hipertexto/hipermedia, que proporciona una interface común a los distintos formatos de datos (texto, gráficos, video, audio) y a los servicios de internet existentes (UM, 2011). El diseño de la página web debe estar determinado por cada uno de sus requerimientos y emplear el lenguaje HTML, CSS y JavaScript para definir su contenido.

Tanto la aplicación móvil de captura de datos, como la visualización estadística-geográfica, el sistema de consulta y elaboración de la implementación y unión del sistema se pueden realizar con el uso avanzado y exhaustivo de la programación. También es posible crear el sistema empleando código útil para la elaboración de los cuatro grandes componentes que se proponen tener en esta herramienta de gestión en seguridad vial (Figura 2).

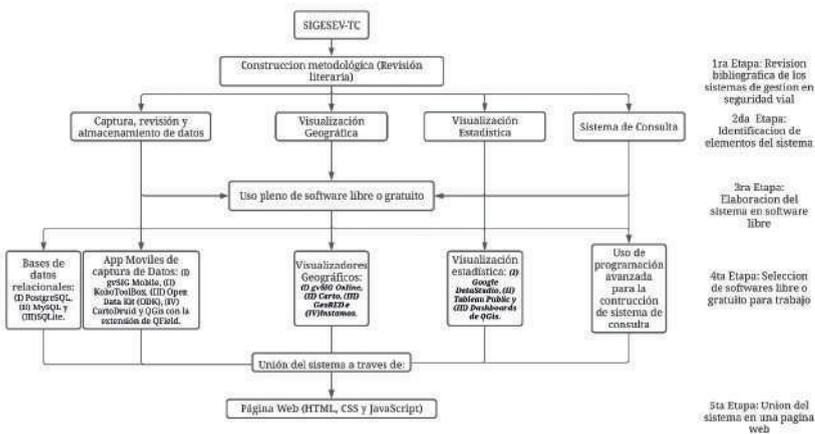


Figura 2. Esquema sintético de la metodología descrita.

Fuente: elaboración propia

### 3. Resultados

La puesta en marcha de la metodología se revisa con la elaboración y estructuración del SIGESEV-TC, el cual cumple con los cuatro parámetros señalados y que se puede visualizar en el siguiente enlace: <http://sigesev-tc.online/>.

#### 3.1 SIGESEV-TC

El Sistema Integrado de Información Geográfica para la Seguridad Vial de la Ciudad de Toluca: SIGESEV-TC (Figura 3) es un portal espacial, estadístico y de consulta para la gestión de la seguridad vial en la capital del Estado de México. Posibilita la gestión, almacenamiento y visualización geográfica de accidentes de tráfico que han ocurrido en esta zona urbana en los últimos 20 años. Contiene tres apartados: análisis multitemporal, SIGESEV-TC: estadística y SIGESEV-TC: geográfico.



**Figura 3.** Entrada principal a SIGESEV-TC.

Fuente: elaboración propia

##### 3.1.1 Análisis multitemporal

Se divide en dos secciones: la primera presenta toda la visualización estadística implementada en Tableau Public (Figura 4) y la segunda combina series temporales animadas de mapas de calor (Figura 5), las cuales se desarrollan en gvSIG Online, donde es posible visualizar el cambio que se produce cada año según el tipo de accidente y muerte por el siniestro.

Para efectos de este proyecto se cuenta con datos de accidentes de tránsito del 2000 al 2019. Gracias a Tableau Public se puede relacionar y visualizar diferentes factores relacionados con un accidente vial, como la ubicación geográfica, fecha y hora de ocurrencia, elementos físicos que intervienen en la

generación de un siniestro vial, la gravedad, la tasa de mortalidad del evento y la cuantía de los daños humanos y materiales causados por los accidentes de tránsito. Este *dashboard* contiene gráficos de barras, diagramas de dispersión, histogramas, tablas y un mapa interactivo que permite la visualización geográfica de los eventos ocurridos en la infraestructura vial.

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL: SIGESEV-TC**

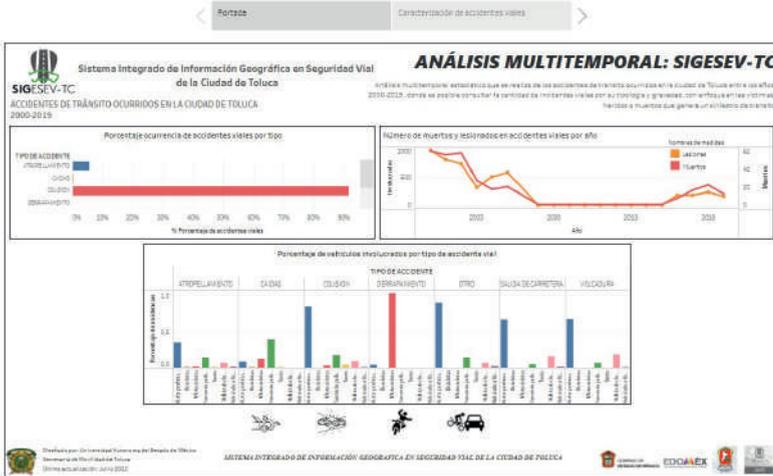


Figura 4. SIGESEV-TC AM – estadísticas / portada.

Fuente: SIGESEV-TC.

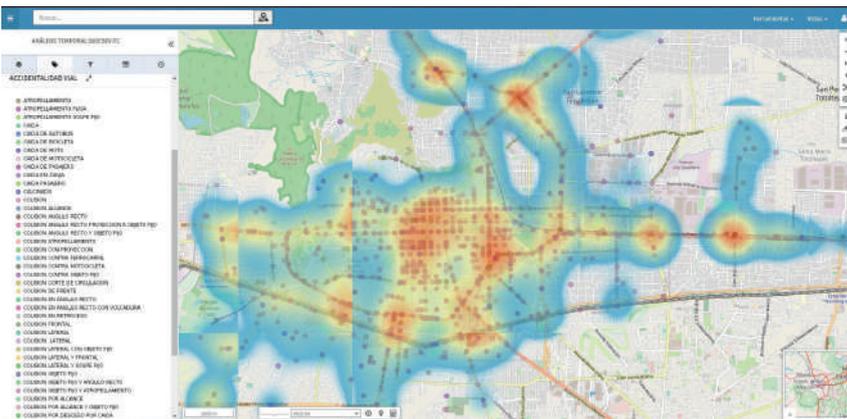


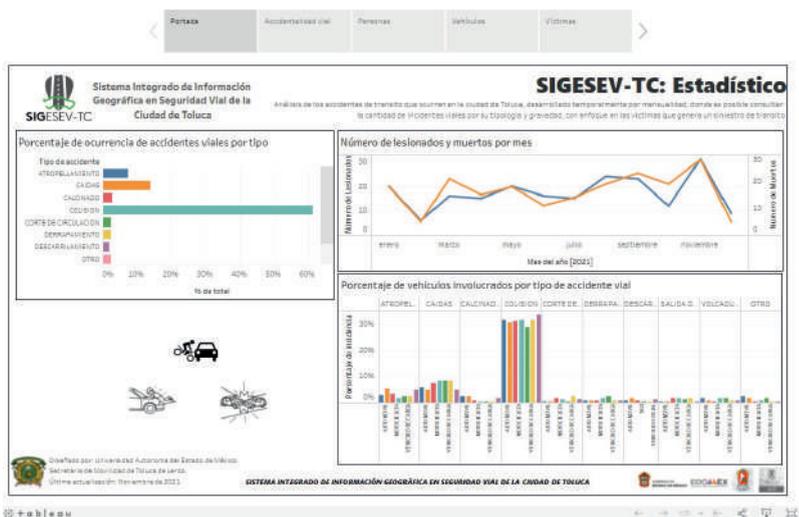
Figura 5. SIGESEV-TC AM - visualizador geográfico. Se visualizan los accidentes que han ocurrido en los últimos 20 años en la ciudad de Toluca.

Fuente: SIGESEV-TC.

### 3.1.2 SIGESEV-TC: estadística

En el primer apartado, denominado “Portada” (Figura 6), se muestra un resumen de índices de siniestralidad en carretera por tipo, el número de heridos y muertos al mes y la tasa de vehículos implicados por tipo de siniestro. El segundo apartado, “Accidentalidad vial”, analiza la fatalidad del accidente y el tipo de evento, se ubica geográficamente, la ocurrencia del siniestro por colonia y por el tipo de superficie. En el tercer apartado, “Personas”, se estudian los factores humanos que intervienen en los accidentes de tránsito, la relación entre las víctimas y el tipo de accidente, el número de víctimas por tipo de lesión, por edad y sexo, por tipo de accidente y, finalmente, el número de heridos y muertos por tipo de accidente. El cuarto apartado se titula “Vehículos” y analiza numéricamente los vehículos involucrados por tipo (automóvil, autobús, bicicleta, vehículo oficial, motocicleta), el número de vehículos por tipo de accidente, número de vehículos involucrados por modelo y daños por tipo de accidente automovilístico. La quinta y última parte se denomina “Víctimas” y desglosa detalladamente las víctimas por grupo de edad, por la función que cumplen en el accidente vial y una matriz por día y hora del incidente de la víctima. Los anteriores apartados se visualizan de manera mensual, por lo que al activar la herramienta de series de tiempo, discrimina los accidentes de tránsito según su fecha de ocurrencia.

La información contenida en esta área corresponde a los nuevos datos capturados a partir del formulario propuesto, que se detalla en la sección 3.1.5 de este documento.

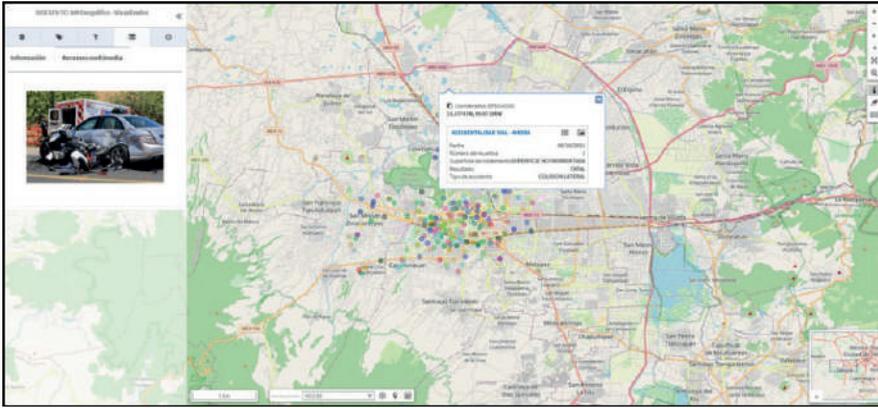


**Figura 6.** SIGESEV-TC: estadística / portada. Es posible visualizar las cinco categorías del sistema estadístico.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos capturados con el formulario implementado en KoboCollect.

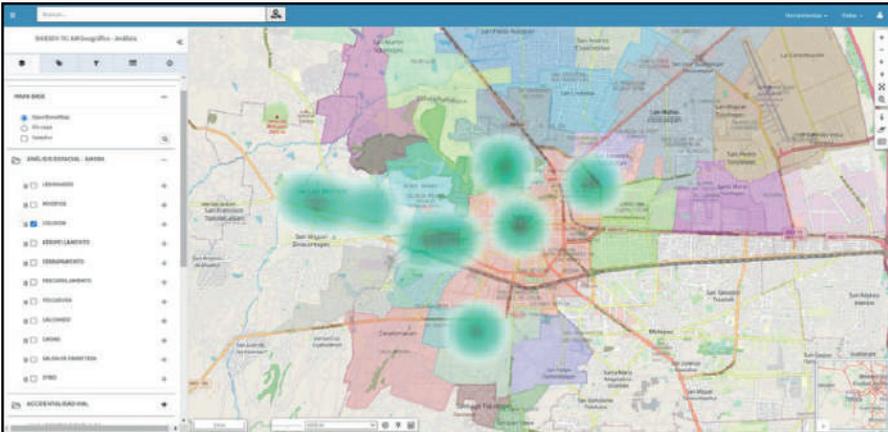
### 3.1.3 SIGESEV-TC: Geográfico

En esta sección se aprecia la ubicación geográfica del accidente vial (Figura 7); además, el contenido dinámico de imágenes hace posible visualizar la magnitud del accidente y los implicados materiales que participan en el siniestro vial. En este apartado se puede relacionar, al igual que con la parte multitemporal, los aspectos socioeconómicos, demográficos, infraestructurales y topográficos del



**Figura 7.** SIGESEV-TC: geográfico / visualizador accidentalidad.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos capturados con el formulario implementado en KoboCollect.



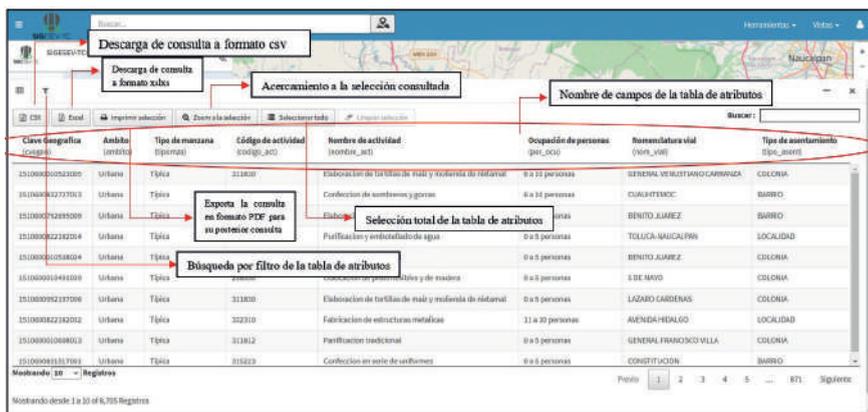
**Figura 8.** SIGESEV-TC: geográfico. Mapas de calor, se identifican los puntos calientes donde suceden los siniestros de tránsito en la ciudad, con el reconocimiento de la tipología y la temporalidad mensual del suceso.

Fuente: elaboración propia a partir de los datos capturados con el formulario implementado en Kobo Collect.

lugar, con la diferencia de que aquí se aprecia una fotografía del accidente de tránsito, para conocer la gravedad del percance. De esta forma, es posible analizar los diferentes tipos de accidentes que ocurren mensualmente en la capital del Estado de México. Asimismo, gracias a la metodología de superposición de capas es posible el análisis espacial de un accidente de tránsito. En esta sección se analizan los accidentes viales por la densidad espacial de sucesos; también, por el tipo de siniestro se reconoce la influencia de accidentes que ocurren en un lugar determinado. A diferencia de los anteriores mapas de calor (Figura 8), este visualizador se destaca por su temporalidad, pues el análisis se hace cada mes, mientras que el multitemporal se hace anualmente. A partir de la nueva metodología propuesta para la captura de datos se muestra mayor información para analizar.

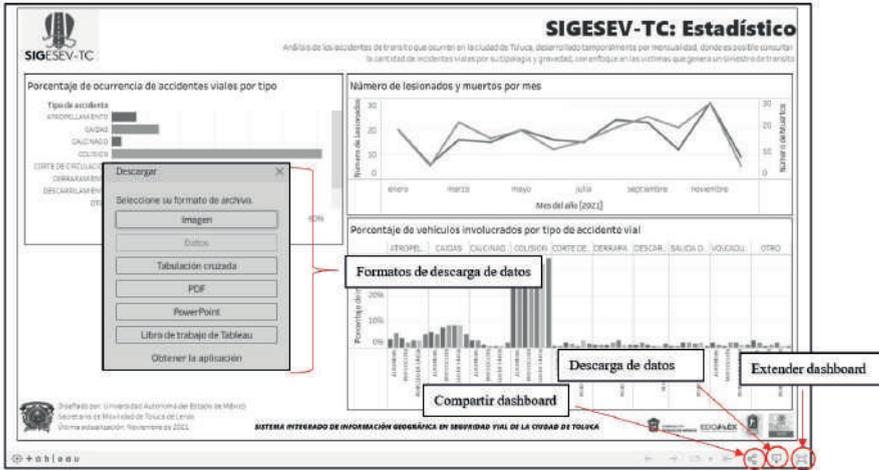
### 3.1.4 SIGESEV-TC: consulta

Para las secciones mencionadas, es posible la consulta y descarga de la información geográfica que contiene los visualizadores y los dashboard. Para los visualizadores geográficos existe la tabla de atributos, cuya información consultada se puede descargar en los formatos CSV, XLSX y PDF. La opción de filtros permite la búsqueda y clasificación de la información de interés; por ejemplo, en la interfaz del visualizador de cada capa se despliega el menú de opciones, que también es posible descargarla en formato Shapefile (Figura 9).



**Figura 9.** SIGESEV-TC: geográfico. Descarga de datos a partir de la tabla de atributos. Fuente: elaboración propia a partir de la visualización en gvSIG Online.

De esta manera, en cada uno de los dashboard es posible descargar la información visualizada en el sistema, en formato imagen, tabulación cruzada, pdf, PowerPoint o en libro de trabajo de Tableau (Figura 10).



**Figura 10.** SIGESEV-TC: estadística. Descarga de datos a partir de la visualización de dashboards. Fuente: elaboración propia a partir de la visualización en Tableau Public.

### 3.1.5 GEAV-TC

La Gestión de Atención del Accidente Vial de la ciudad de Toluca (GEAV-TC) tiene como objetivo principal llevar a cabo la consolidación, integración y actualización continua de la base de datos de siniestralidad vial almacenada en el SIGESEV-TC. Igualmente, modifica el formulario que la Dirección de seguridad vial y de tránsito de la ciudad de Toluca usa para la captura de información, con el fin de concentrar más datos para el análisis exhaustivo del fenómeno de la accidentalidad vial, como la caracterización del accidente vial, las personas, las víctimas y los vehículos implicados.

Gracias a KoboToolBox es posible integrar y recolectar datos de los accidentes viales que ocurren en la ciudad de Toluca y conocer la información espacio-temporal del siniestro de tránsito, información de los vehículos involucrados, datos sobre las personas implicadas e información sobre la atención médica. Los datos capturados se visualizan en SIGESEV-TC: geográfico y SIGESEV-TC: estadístico, para actualizar mensualmente la siniestralidad vial de la capital de la entidad. En el formulario se contemplan distintas áreas (Figura 11). En el primer apartado se considera la hora y fecha del suceso, la zona donde ocurrió el siniestro (colonia, localidad o código postal), para ello son obligatorias las coordenadas geográficas; igualmente, es importante detallar las condiciones meteorológicas y de la infraestructura vial, para determinar posibles causas. En el segundo apartado se toma en cuenta la cantidad de vehículos involucrados, tipo y marca, y los daños que sufrieron en el siniestro. El tercer apartado tiene en cuenta cada una de las víctimas del suceso, por lo que se deben concentrar sus datos como edad, género y la función que cumple dentro del accidente

(peatón, ciclista, motociclista, conductor, pasajero o acompañante); finalmente se reconoce el tipo de lesión.

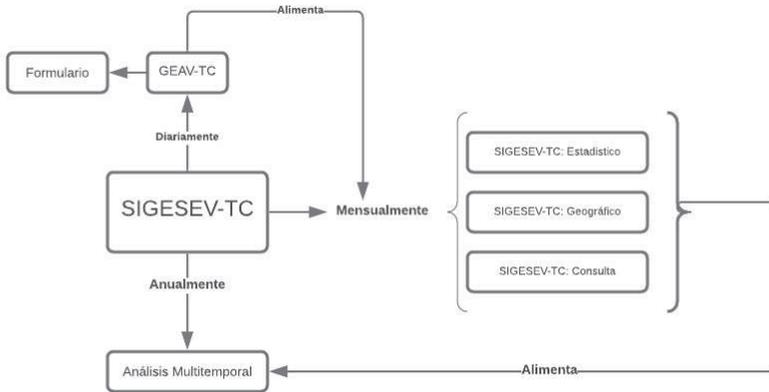
**Figura 11.** GEAV-TC. Formulario desarrollado en KoboToolBox para migrarlo a la aplicación móvil de KoboCollect. Fuente: elaboración propia con base en Chagas (2014).

### 3.2 Diseño de página web

SIGESEV-TC cuenta con una arquitectura cliente-servidor, en la que es posible la interacción intuitiva con el usuario. El presente proyecto contiene una arquitectura en tres capas: la primera está dada por la presentación que se pone en funcionamiento con HTML, CSS y JavaScript; la segunda, con la capa de negocios, y la tercera, con la capa de datos. Los usuarios que van a utilizar SIGESEV-TC se dividen en dos: el usuario y administrador, quienes pueden interactuar y analizar la información presente en el sistema integrado de información geográfica, a partir de diversos requerimientos funcionales: contiene un manual que permite al usuario conocer el sistema para su rápida familiarización; es posible el vínculo a las páginas web del área de movilidad del Estado de México y del ayuntamiento de Toluca; permite la visualización de los datos geográficos y estadísticos que relacionan los accidentes viales que sucedieron en los últimos 20 años; al usuario sólo se le permite la visualización de los datos geográficos y estadísticos, mientras que el administrador puede manipular y editar los datos; se cuenta también con el servidor de correo, donde cualquier usuario puede enviar sus mensajes, y, por último, es posible descargar las capas geográficas en el formato Shapefile para cualquier cliente del SIGESEV-TC.

### 3.3 Funcionamiento de SIGESEV-TC

SIGESEV-TC también es una herramienta de actualización y almacenamiento de los datos que se capturan periódicamente (Figura 12). Se tiene información de los accidentes ocurridos en los últimos 20 años, que corresponde al análisis multitemporal. La nueva propuesta de la GEAV-TC y su formulario recolectan datos de cada siniestro, lo que se convierte en el insumo principal para alimentar a los elementos que conforman al SIGESEV-TC; por esta razón, cada vez que se ingresa información sobre un accidente vial queda registrado en la base de datos de PostgreSQL, para que los administradores, mensualmente, puedan generar estadísticas y mapas de la siniestralidad vial.



**Figura 12.** Flujograma del funcionamiento de SIGESEV-TC.

Fuente: elaboración propia.

## 4. Discusión de resultados

SIGESEV-TC es una herramienta fundamental para realizar análisis estadísticos y geográficos de la siniestralidad vial que sufre la capital del Estado de México. *El propósito esencial de este proyecto no es el análisis, sino poner a disposición la información de los siniestros viales para los diferentes usuarios que la requieran.* A continuación, se hace un *pequeño* análisis descriptivo que se puede realizar con el uso de esta herramienta geotecnológica de la incidencia de accidentes de tránsito durante el periodo 2016-2018. No se realiza un análisis de toda la base de datos geográfica debido a que según los objetivos del presente estudio, no es el análisis de la información, sino la presentación metodológica de la creación y el diseño de SIGESEV-TC.

#### 4.1 Análisis multitemporal

Se examina la incidencia de siniestros de tránsito en el periodo 2016-2018, lo que permite analizar y comparar si existe una disminución considerable de la accidentalidad vial en la ciudad. Los meses de mayor riesgo son marzo y octubre y los meses de menor incidencia son julio y diciembre. Al mes se presentan 180 siniestros en la capital, es decir, cinco diarios.

**Tabla 2.** Accidentes ocurridos por mes en el periodo 2016-2018 en la Ciudad de Toluca

<i>Mes/Año</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>Total</i>
Enero	173	203	163	539
Febrero	150	184	188	522
Marzo	157	244	194	595
Abril	169	202	178	549
Mayo	146	203	178	527
Junio	156	195	182	533
Julio	129	165	161	455
Agosto	184	188	188	560
Septiembre	197	190	164	551
Octubre	200	207	175	582
Noviembre	168	218	186	572
Diciembre	157	182	147	486
<i>Total</i>	<i>1986</i>	<i>2381</i>	<i>2104</i>	
Promedio anual	165	198	175	
Accidentes por día	5	6	5	

**Fuente:** elaboración propia, con datos de la Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del Municipio de Toluca

En la Tabla 3 se registran 2,157 siniestros de tránsito en promedio al año, de los cuales hay 42 lesionados y 23 muertos. Esto significa que por cada 51 accidentes hay un lesionado y por cada 94, un muerto.

El análisis de la accidentalidad vial se reconoce también por la tipología del siniestro vial. La Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del municipio de Toluca reconoce: colisión, atropellamiento, caída, volcadura, derrapamiento y salida de carretera. Según la tabla 4, el mayor tipo de accidente es la colisión y el atropellamiento, con un promedio al año de 2 052 y 75, respectivamente.

El análisis de la accidentalidad vial se reconoce también por la tipología del siniestro vial. La Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del municipio de Toluca reconoce: colisión, atropellamiento, caída, volcadura, derrapamiento y salida

**Tabla 3.** Relación de Lesionados y muertos vs al número de accidentes ocurridos en la ciudad de Toluca

<i>Año/daño</i>	<i>Lesiones</i>	<i>Muertos</i>	<i>Núm. de accidentes</i>
2016	41	17	1986
2017	41	20	2381
2018	45	32	2104
Total	127	69	6471
Promedio	42	23	2157

**Fuente:** elaboración propia, con datos de la Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del Municipio de Toluca.

**Tabla 4.** Ocurrencia de siniestros de tránsito por tipología 2016-2018

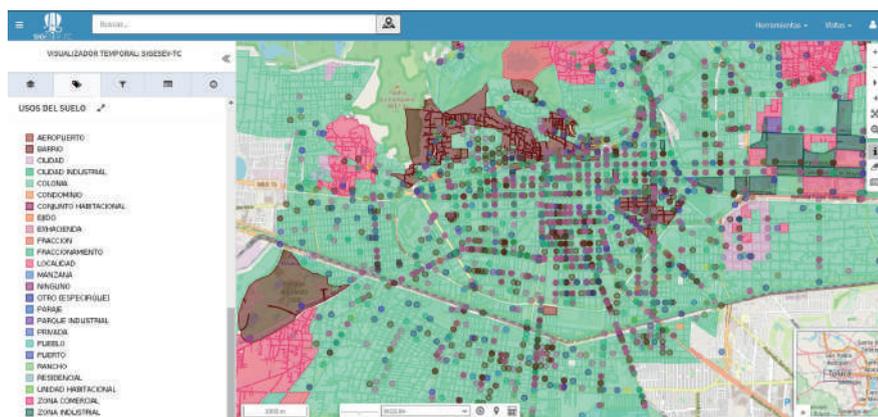
<i>Tipo ACC/año</i>	<i>2016</i>	<i>2017</i>	<i>2018</i>	<i>Promedio anual</i>
Colisión	1887	2307	1962	2052
Atropellamiento	80	49	98	75
Caídas	9	17	22	16
Volcadura	7	6	14	9
Derrapamiento	3	2	8	4
Total	1986	2381	2104	

**Fuente:** elaboración propia, con datos de la Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del Municipio de Toluca.

de carretera. Según la tabla 4, el mayor tipo de accidente es la colisión y el atropellamiento, con un promedio al año de 2 052 y 75, respectivamente.

El análisis geográfico está determinado por el visualizador del gvSIG Online, el cual permite relacionar las capas geográficas que se detallan en el apartado 2.2 de este documento, en el que se observan las zonas con mayor densidad de siniestros de tránsito, las vialidades donde se concentran, la población vulnerable a ser perjudicada por un accidente vial e identificar los usos del suelo donde ocurren estos sucesos. En principio, se reconoce que gran parte de los accidentes de tránsito se encuentra en la zona centro de la ciudad (colonia Centro, 5 de mayo y Francisco Murguía). Al relacionar estas zonas con el uso del suelo, se detectó que se trata de un área comercial y de servicios, donde hay mayor flujo económico de la ciudad y, por consiguiente, una considerable afluencia vehicular y peatonal, es decir, es más probable que aquí se produzca un siniestro vial. Por lo tanto, la actividad comercial y de servicios está asociada con una mayor incidencia de accidentes (más de 4 000 siniestros registrados durante el periodo de estudio en esta zona) (Figura 13).

Respecto a las vialidades, es lógico que en las principales se encuentre el mayor número de siniestros de tránsito, debido al alto flujo vehicular y al exceso de velocidad (paseos Adolfo López Mateos, Tollocan y Colón, avenidas Isidro Fabela, Alfredo del Mazo y José López Portillo). Se suman las vías de segundo orden, ya que al ser una conexión con las vialidades primarias presentan los mayores índices de accidentalidad.



**Figura 13.** Relación de los accidentes viales y su respectivo uso del suelo.

Fuente: elaboración propia

## 4.2 SIGESEV-TC: geográfico y estadístico

Los datos suministrados por la Dirección de Seguridad Vial y Tránsito del municipio de Toluca no son suficientes para realizar análisis exhaustivos discriminados respecto a los factores que influyen en un accidente de tránsito, como vehículos, personas, víctimas y características particulares del accidente.

La sección 3.1.5 de este documento presenta una nueva propuesta para la captura de datos referentes a un accidente de tránsito, con ello se amplía la información para analizar a detalle el fenómeno de siniestralidad vial. Se espera que con el nuevo formulario sea posible estudiar con más precisión y detalle: la localización, las personas involucradas en el siniestro vial, el número de sujetos implicados con su función respectiva (acompañante, motociclista, ciclista, conductor o peatón), el tipo de lesión que sufrió la persona, su edad, género, así como la tipología del accidente.

## 5. Conclusiones

Los sistemas de información geográfica son una herramienta indispensable para la solución de problemáticas a nivel de seguridad vial. El SIGESEV-TC es la prueba de tal afirmación, pues al relacionar aspectos espaciales y estadísticos

en la solución de la problemática que sufre la ciudad de Toluca es posible tener un panorama amplio de este fenómeno, que no sólo sufre la capital del Estado de México, sino múltiples ciudades del país y alrededor del mundo.

La seguridad vial es un tema que se debe tratar con la suficiente seriedad, debido a que uno de los grandes índices de mortalidad en una ciudad se debe a los siniestros de tránsito. De ahí que cada gobierno municipal y estatal debería destinar parte de sus recursos a tratar de solucionar esta problemática, para que la ciudad desarrolle un ambiente seguro y, de manera adecuada y organizada, consiga ser una ciudad inteligente, capaz de administrar sus recursos económicos, sociales y tecnológicos para el avance de la metrópolis en la que viven millones de personas.

Igualmente, este sistema hace posible que la ciudad de Toluca administre y gestione la información de accidentes viales, con el fin de prevenirlos, a través del análisis de los datos y la propuesta de metodologías para solucionar los elementos urbanos e infraestructurales que los causan. Una de las ventajas de esta herramienta es que no sólo se utilice en la zona de estudio elegida, sino que se potencie en otras ciudades y municipios de nuestro país y alrededor del mundo, pues la información concentrada en un sistema apoya en la realización de estudios focalizados a la seguridad vial y toma de decisiones.

El uso de software libre en la construcción de este tipo de sistemas hace que la administración del SIGESEV-TC sea fácil de poner en práctica en los gobiernos y no genera gastos excesivos para su funcionamiento. Por lo tanto, el SIGESEV-TC no sólo es una herramienta íntegra por los datos que utiliza, sino por su relevancia a nivel informático y administración.

## Bibliografía

- Alcaldía de Medellín (2021). GeoMedellín – Portal Geográfico del Municipio de Medellín. <https://www.medellin.gov.co/geomedellin/index.hyg>
- Alcaldía Mayor de Bogotá D. C. (2021). Sistema Integrado de Información sobre Movilidad Urbana y Regional. <https://www.simur.gov.co/>
- Alonso Sarría, F. (2014). Sistemas de Información Geográfica. <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- Backhoff Pohls, M. Á., & Vázquez Paulino, J. C. (2002). Sistema de Información Geoestadística para el Transporte. Métodos, organización y descripción operativa. <http://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt207.pdf>
- Bosque Sendra, J., & Zamora Ludovic, H. E. (2002). Visualización geográfica y nuevas cartografías. *Geofocus. Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*, 2, 61-77. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3288729>
- Briz-Ponce, L., Juanes-Méndez, J. A., & García-Peñalvo, F. J. (2015). Dispositivos móviles y apps: características y uso actual en educación médica. *Novatica*, 231, 86-91. [https://repositorio.grial.eu/bitstream/grial/424/1/Art%C3%ADculo%20Novatica\\_esp%C3%B1ol.pdf](https://repositorio.grial.eu/bitstream/grial/424/1/Art%C3%ADculo%20Novatica_esp%C3%B1ol.pdf)

- Calle Paz, I. I., & Valles Coral, M. A. (2021). Dashboard digital para el monitoreo de indicadores y metas de los proyectos de consultores San Martín E.I.R.L. *Revista Científica de Sistemas e Informática*, 1(1), 24-36.  
<https://doi.org/10.51252/rcsi.v1i1.94>
- Chagas, D. M. (2014). Herramientas para el reconocimiento de los factores que causan los accidentes de tráfico: estudio de caso en Brasil. Fortaleciendo al sector académico para reducir los siniestros de tránsito en América Latina: investigaciones y casos de estudio en seguridad vial. Banco Interamericano de Desarrollo, Washington D. C., 24-39.  
<https://publications.iadb.org/es/publicacion/17522/fortaleciendo-el-sector-academico-para-reducir-los-siniestros-de-transito-en>
- Falgueras, E. A. (2014). Elementos para la evaluación de interfaces de consulta de bases de datos web. *El Profesional de la Información*, 11(5), 349-360.  
<https://doi.org/10.1076/epri.11.5.349.20225>
- Galicia, E. (2021). Prototipo de sistema de consulta de accidentes viales para los tomadores de decisiones orientados a la seguridad vial en el ayuntamiento del municipio de Toluca, Estado de México.
- Galileo Ingeniería y Servicios (2011). Sistema de Visualización y Explotación de Datos Geográficos. *Ingeniería y Servicios*, 1-6.  
[https://obj.construmatica.com/construmatica/business/files/27723/visualizacion\\_y\\_explotacion\\_de\\_datos\\_geograficos.pdf](https://obj.construmatica.com/construmatica/business/files/27723/visualizacion_y_explotacion_de_datos_geograficos.pdf)
- GITS (2020). Geotecnología en Infraestructura Transporte y Sustentabilidad. *Geografía de la Seguridad Vial*. <https://www.gits.igg.unam.mx/portal/lineas-investigacion/geografia-de-la-seguridad-vial/inicio.html>
- Hinojosa Reyes, R. (2017). Infraestructura urbana, factor influyente de la movilidad urbana y por consecuencia impacta en la seguridad vial, y en la salud pública de la ciudad: caso de estudio, zona metropolitana de la ciudad de Toluca. *Proyección*, 21, 124-144. <https://bdigital.uncu.edu.ar/10300>
- INSP (2020). México, séptimo lugar mundial en siniestros viales. *Gobierno de México*. <https://www.insp.mx/avisos/4761-seguridad-vial-accidentes-transito.html>
- ISO (2012). ISO 39001:2012. *Sistemas de gestión de la seguridad vial. Requisitos y recomendaciones de buenas prácticas*.  
<https://cmdcertification.com/wp-content/uploads/2020/03/ISO-39001-2012.pdf>
- ISO (2013). ISO 19157:2013. Geographic Information-Data Quality.  
<https://www.iso.org/standard/32575.html>
- López, D., & Torres, A. (2015). ¿Cuáles son los componentes del dato espacial? Centro de Investigación en Geografía y Geomática, 1-15. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/181/1/08%C2%BF%20Cu%C3%A1les%20son%20los%20Componentes%20del%20Dato%20Espacial%20-%20Diplomado%20en%20An%C3%A1lisis%20de%20Información%20Geoespacial.pdf>
- Morales, V. P. (2021). *Diseño, creación e implementación de un Dashboard para el seguimiento de peticiones de servicios en el área de mantenimiento, planeación y control de FORD España*. Universidad Politécnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/handle/10251/174864>
- Nieto Masot, A., Navazo Arenas, G., & Moreno Marcos, G. (2016). Aplicación de las tecnologías SIG en el análisis de la seguridad vial de las carreteras extremeñas. A. Nieto Masot (ed.), *Tecnologías de la información geográfica en el análisis*

*espacial. Aplicaciones en los sectores público, empresarial y universitario.* Grupo de Investigación en Desarrollo Sostenible y Planificación Territorial y Grupo de Investigación Geo-Ambiental de la Universidad de Extremadura, España, 247-268. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5776243>

- Postigo, R., Escolano, C., Arranz-López, A., Solé, C., Campos, Á., Zúñiga Antón, M., & Hernández-Navarro, M. L., (2013). *Herramientas cartográficas y de visualización para los observatorios territoriales: la valoración de la proximidad de la población a las zonas verdes, equipamientos y servicios en la ciudad de Zaragoza (España)*. 269278885\_Herramientas\_cartograficas\_y\_de\_visualizacion\_para\_los\_observatorios\_territoriales\_la\_valoracion\_de\_la\_proximidad\_de\_la\_poblacion\_a\_las\_zonas\_verdes\_equipamientos\_y\_servicios\_en\_la\_ciudad\_de\_Zaragoza
- Ripoll, L. Q. (2008). *Sistemas de gestión de bases de datos*. Módulo VII: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección. EOI. <https://static.eoi.es/savia/documents/componente45499.pdf>
- Robalino, A. D. (2017). *Metodología para el diseño de Dashboards orientado hacia el registro de evidencias en el proceso de evaluaciones institucionales*. Máster thesis, Universidad Internacional de La Rioja. <https://reunir.unir.net/handle/123456789/6171>
- Rodríguez-Dueñas, W. R. (2014). Software libre para educación e investigación en ingeniería. *Revista Educación en Ingeniería*, 9(18), 12-22. <http://www.educacioneningenieria.org/index.php/edi/article/view/383>
- Sánchez Fernández, D., Erena, M., Gambín, M., Hernández, Z., Juárez, J. F., López, J., Pina, D., García, P. & Clemente, A. (2013). *Una herramienta de código abierto para la estrategia territorial en el espacio MED: Geo portal SDIMED*. [https://www.researchgate.net/publication/259501990\\_Una\\_herramienta\\_de\\_codigo\\_abierto\\_para\\_la\\_estrategia\\_territorial\\_en\\_el\\_espacio\\_MED\\_Geoportal\\_SDIMED](https://www.researchgate.net/publication/259501990_Una_herramienta_de_codigo_abierto_para_la_estrategia_territorial_en_el_espacio_MED_Geoportal_SDIMED)
- SE y Datawheel (2020). *Municipio del Estado de México-Toluca. DataMéxico*. <https://datamexico.org/es/profile/geo/toluca?indicatorCensus=Total+Income&totalGenderSelector1=gender0#industrial-parks>
- Stallman, R. (2015). Software libre para una sociedad libre. *Traficante de Sueños*. Madrid, <https://es.scribd.com/doc/66456068/Software-Libre-para-una-sociedad-libre-Richard-Stallman>
- Thompson, F. (2016). *Cómo armar una verdadera arquitectura tecnológica*. CIO México, 4 de enero. <https://cio.com.mx/armar-una-verdadera-arquitectura-tecnologica/>
- UM (2011). *Manual básico de creación de páginas web. Universidad de Murcia y Área de la Tecnología de la Información y las Comunicaciones Aplicadas*. <https://www.aragonemprendedor.com/archivos/descargas/html.pdf>
- Wong Durand, S. (2017). *Análisis y requerimientos de software: manual autoformativo interactivo*. Universidad Continental, 1-128. [https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/4281/1/DO\\_FIN\\_103\\_MAI\\_UC0939\\_2018.pdf](https://repositorio.continental.edu.pe/bitstream/20.500.12394/4281/1/DO_FIN_103_MAI_UC0939_2018.pdf)
- Zaragoza, M., & Islas, V. (2017). *Análisis de los sistemas de transporte. Vol. I: conceptos básicos*. 307, Secretaría de Comunicaciones y Transporte e Instituto Mexicano del Transporte, 75. <https://www.imt.mx/archivos/publicaciones/publicaciontecnica/pt307.pdf>

# Dendrogeomorphology as a tool to depict hydrogeomorphic processes in the tropics

La dendrogeomorfología como una herramienta para representar procesos hidrogeomorfológicos en los trópicos

Adolfo Quesada-Roman<sup>1</sup>

*Recibido 8 de agosto de 2022; aceptado 24 de septiembre de 2022*

## ABSTRACT

Climatic and anthropogenic changes cause the deprivation of distinct ecosystems in Costa Rica, transforming climatic, ecological, and geomorphic conditions. The high tropical biodiversity of Costa Rica and the tropics is suitable to improve the understanding of hydrogeomorphic process dynamics and to produce baseline data on past disasters in scarce-data regions. The principal motivation to connect natural hazards and dendrochronology on tropics is the desire to create methods that can reduce its exposure and vulnerability. The principal research aim of this study is to give reference data that can improve the understanding of hydrogeomorphic processes and to explore the potential of tropical trees in dendrochronological applications. This paper combines remote sensing, meteorological assessments, and dendrochronology analyses, hydraulic modelling, and risk assessments. This innovative research describes the reduced understanding in tree-ring analysis in Costa Rica related with past disasters and their linkage to climate. This study will likely contribute to the implementation of new methodologies in disaster risk research, and it will promote future adaptation strategies in the most biodiverse region of the world.

*Key words: dendrochronology, natural hazards, disaster risk reduction, tropics, developing countries.*

## RESUMEN

Los cambios climáticos y antropogénicos están contribuyendo a la degradación de diferentes ecosistemas en Costa Rica, alterando así las condiciones climáticas,

<sup>1</sup> Universidad de Costa Rica, e-mail: [adolfo.quesada@gmail.com](mailto:adolfo.quesada@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6601-5254>.

ecológicas y geomórficas. La hipótesis de este trabajo es que la alta biodiversidad tropical de Costa Rica y los trópicos es adecuada para mejorar la comprensión de la dinámica de los procesos hidrogeomórficos y generar datos de referencia sobre desastres pasados en una región con datos limitados. La principal motivación para vincular las amenazas naturales y la dendrocronología en esta región de baja latitud es la persistente escasez de datos sobre procesos hidrogeomórficos pasados y el deseo de definir métodos que puedan reducir su exposición y vulnerabilidad. Por lo tanto, el principal objetivo de investigación de este estudio fue proporcionar datos de referencia que puedan mejorar la comprensión de los procesos hidrogeomórficos, así como explorar el potencial de las especies de árboles tropicales en aplicaciones dendrocronológicas. Por lo tanto, este estudio combina sensores remotos, evaluaciones meteorológicas y técnicas de anillos de árboles con análisis estadísticos, modelos hidráulicos y evaluaciones de riesgos. La naturaleza innovadora de esta investigación describió la muy limitada experiencia disponible en términos de análisis de anillos de árboles en Costa Rica y la clara falta de comprensión sobre desastres pasados y su vínculo con el clima. Es probable que este estudio contribuya a la implementación de nuevas metodologías en la investigación del riesgo de desastres y, con suerte, contribuirá a futuras estrategias de adaptación en los trópicos, la región con mayor biodiversidad del mundo.

Palabras clave: *dendrocronología, amenazas naturales, reducción del riesgo de desastres, trópicos, países en desarrollo.*

## 1. Introduction

Weather-related disasters tend to sum most casualties and economic losses every year at a worldwide level. Forecasting hydrometeorological hazards remains challenging despite improved knowledge of potential triggers and sophisticated climato-logical models. Furthermore, climate change will affect the occurrence and the nature of processes, rendering accurate predictions even more challenging in data-scarce regions. Global warming is expected to lead to an increase in flooding over the decades to come, with delicate consequences on livelihoods (UNDRR, 2019; Pinos & Quesada-Román, 2022). Therefore, more research is therefore critically needed to reduce uncertainties of climate change scenarios related to climate and hydrological models (Kundzewicz *et al.*, 2018).

The tropics count for approximately 20% of the world land surface (Peel *et al.*, 2007), but they accommodate the 50% of the global population (Tatem, 2017), and are affected by substantial land-use changes (Hettig *et al.*, 2016). Moreover, developing countries have fast urbanization and increasing population density processes resulting in greater exposure and vulnerability (Mitchell *et al.*, 2015). Consistently, low-latitude regions usually present high values for expected socio-economic losses due to earthquakes, volcanic risks, landslides, floods, storm surges, and tropical cyclones (Figure 3). Developing countries in the low latitudes are largely more affected by disasters worldwide (Noy, 2009).

Most common hydrometeorological hazards on tropics are landslides, floods, tropical storms, and droughts (UNISDR, 2009). On one hand, tropical regions are

hotspots for landslides (Lin *et al.*, 2017). Landslides are linked to rainfall intensity and duration (Segoni *et al.*, 2018; Carrión *et al.*, 2021). The past and projected global mortality risk of landslide around the world shows a close link with tropical mountain regions (Kirschbaum *et al.*, 2015; Shi & Karspersen, 2015). On the other hand, tropical floods are controlled by land-use changes, floodplain occupation, intense yearly or extraordinary rainfall processes (Syvitski *et al.*, 2014). Different climatic modes (e.g., AMO and ENSO) control the occurrence of extraordinary rainfall events in low latitudes such as tropical cyclones (Goldenberg *et al.*, 2001; Sun *et al.*, 2017; NOAA, 2022). Thus, bigger inlets and faster change rates have recently caused more extreme tropical floods (Wohl, 2006).

Hydrogeomorphology is an interdisciplinary discipline focusing on interactions of hydrologic with geomorphic processes in their temporal and spatial dimensions (Sidle & Onda, 2004). Depending on the scale, climate, topography, soils, vegetation, and land use affect differentially hydrogeomorphic processes. Most catchment studies still lack the information to measure runoff, erosion processes, and sediment transport processes. There is a necessity to perform these studies at different scales, combined with long-term catchment monitoring to generate field data to parameterize, test, and accurately calibrate numerical models (Sidle *et al.*, 2017). Nonetheless, such information normally lacks in low latitudes (Wohl *et al.*, 2012).

Dendrogeomorphic applications provide results that can reduce the information gaps of regions with data scarcity. Botanical evidence is a critical proxy to determine the magnitude and frequency of hydrogeomorphic processes, e.g., floods, landslides, and debris flows (Stoffel & Bollschweiler, 2008; Stoffel *et al.*, 2013; Stoffel & Corona, 2014). A key implication of the vegetation-hydrogeomorphology linkage is that woody plants can allow reconstruction of ecological and hydrogeomorphic processes over several decades to centuries (Stoffel & Wilford, 2012). The hydrogeomorphic process information gathered by means of dendrogeomorphic techniques can certainly improve model uncertainties, event reconstruction and hazard zonation (Allen *et al.*, 2018).

Since data on past events is critically lacking in tropical regions, this research aims to investigate the potential of tropical dendrochronology to assess hydrogeomorphic processes and to reduce uncertainties for risk assessments. Tropical mountains are dynamic regions with energetic torrents that commonly comprise dense vegetation, making possible the dendrogeomorphology implementation as a reliable method to assess hydrogeomorphic processes. Therefore, this research will present geomorphic, hydrological, dendrochronological, and risk assessment applications made in Costa Rica as a tropical/development study example for limited data regions/countries.

## **2. Materials and methods**

### **2.1. Costa Rica: an Earth sciences' small lab**

Tectonic activity of Costa Rica is composed by the interaction subduction margin of the Cocos and Caribbean plates, the microplate of Panama, and the

subduction of the Cocos volcanic ridge (Alvarado *et al.*, 2017). The country is divided in three morphotectonic units: a forearc, a volcanic front, and a backarc that comprise the country's lithology (Marshall, 2007). The forearc widens along the Pacific seaside with intricate morphologies since Cretaceous age (Denyer & Alvarado, 2007). The volcanic front comprises the main cordilleras made mostly of volcanic and sedimentary rocks since Paleogene age (Alvarado, 2021). The backarc spreads since the Caribbean plains of Tortuguero's flatlands to the hilly relief of the south Caribbean (Quesada-Román & Pérez-Briceño, 2019). The principal geomorphic dynamics in the country are fluvial, volcanic, and coastal, but some karstic and glacial areas also pop up (Quesada-Román & Pérez-Umaña, 2020).

The continuous sequence of cordilleras that cross over Costa Rica with an NW-SE alignment characterizes the Pacific and Caribbean basins. This topographic barrier also controls the amount of rainfall in each basin: Pacific and Caribbean (Amador *et al.*, 2010; Quesada-Román *et al.*, 2020b). The Pacific climate shows a bimodal precipitation regime, but it is hard to identify a dry period in the Caribbean climate (Castillo & Amador, 2020). The Caribbean side's annual rainfall totals are up to 3000 mm; they are generally below 3 m in the Pacific. These climatological characteristics justify that over a ninety percent of disasters in the country are hydrometeorological. Moreover, sixty percent are floods and thirty percent are mass movements (Campos-Durán & Quesada-Román, 2017; LA RED, 2022).

The country's population reached 5 million people in 2018, and, over the last decades, its dynamics changed from a significant rurality to a strong urban trend achieving three quarters of the inhabitants in 2011. Mass movement and flooding research have been vast in different regions of the country but mostly in Spanish (Quesada-Román, 2021; 2022). Nevertheless, the production of detailed-scale hazard maps and its combination with vulnerability and risk calculation is scarce (Quesada-Román *et al.*, 2021c).

## 2.2. Fieldwork

Fieldwork for this study summed the experience working in this territory since 2010, but specifically for this research between 2016 and 2019. This study analyzed the hillslopes of the Miravalles volcano, low and flatlands of Upala at northern Costa Rica, and Térraba catchment at southern Costa Rica. Geomorphological mapping fieldwork procedures were made characterizing gravitational and fluvial landforms and checking the pre-mapping subproducts in all the sites. During the field surveys dendrogeomorphic techniques were used taking samples from impacted trees to reconstruct the water heights using their scars in Térraba catchment. These heights were after used to model hydraulic models and calculate peak flows. During field-works drone flights were made to survey river reaches that eventually were used in hydraulic models.

### 2.3. Statistical analysis

This study applied Pearson correlation equations and performed generalized linear models (GLM) to describe statistically significant linkages between obtained variables with other environmental parameters. Based on the Akaike Information Criterion (AIC), we used a backward selection to contrast the full models against the alternative models. Using z-score co-variables were standardized (regression coefficient divided by standard error). Model variables were used to evaluate the weight of each interaction explaining the studied parameters. Examples of these applications were: a) variables controlling landslides occurrence after an earthquake and hurricane in 2016 at northern Costa Rica (Quesada-Román *et al.*, 2019), and b) geomorphic and hydrological parameters influencing peak discharges at local and regional scale at southern Costa Rica (Quesada-Román *et al.*, 2020a, 2022).

Two-dimensional (2D) hydrodynamic models using IBER were used to model water depth of flood event related to Tropical Storm Nate in 2017 in seven stream reaches (Quesada-Román *et al.*, 2020a). Bed friction was estimated in the reaches with Manning's n roughness coefficient as homogenous roughness units. The following Manning values were used: n= 0.075 (main channel), 0.16 (forest), and 0.08 (sparse vegetation). Modeled successive inlet discharges based on historical extremes were computed. Available data from hydrological data of yearly maximum flows from eight stations from 1962-2019 was employed to apply a regional flood-frequency method employing the Bayesian MCMC (Markov Monte Carlo Chain) algorithm (Quesada-Román *et al.*, 2022).

### 2.4. Risk mapping

First, several morphometric and morphogenetic maps were made in the different stages and places of this work (Quesada-Román & Villalobos-Chacón, 2020). The study follows a threefold stepwise geomorphological mapping which is integrated by a pre-mapping, fieldwork, and post-mapping phase. Those maps are the baseline for other flood and landslides maps. A flood risk assessment merged the regional flood-frequency study coupled with dendrochronology (hazard), a detailed cartography of population/infrastructure density (exposure), and a social development index (vulnerability) in one of the study applications in Térraba catchment (Quesada-Román *et al.*, 2022).

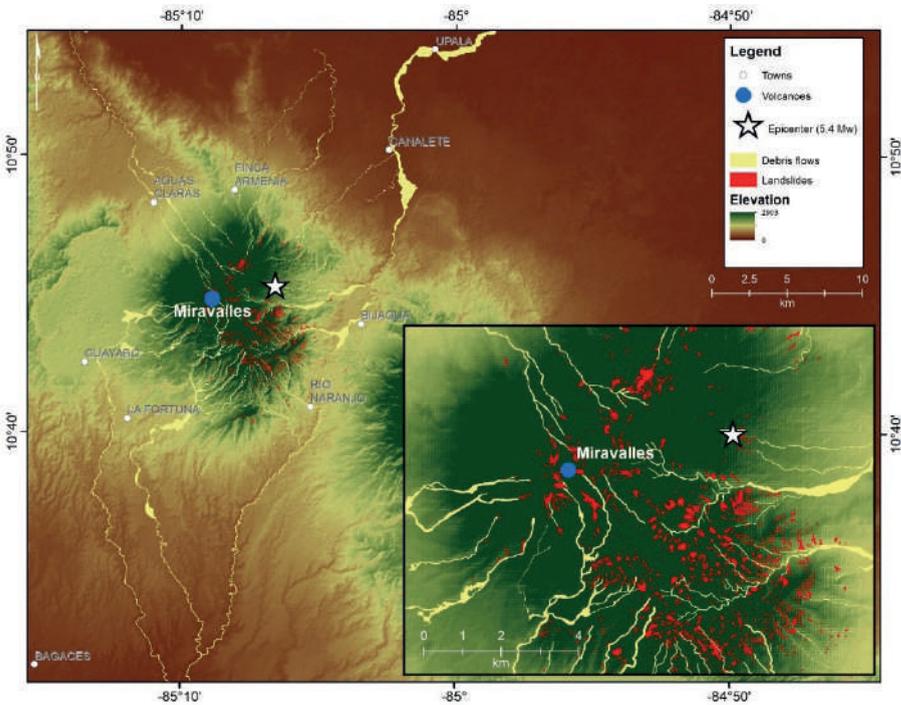
## 3. Results

### 3.2. Can earthquakes, hurricanes, and landslides interact?

The Miravalles volcano, in northern Costa Rica, was impacted by an earthquake of 5.4 Mw (July, 2016) and followed by extraordinary precipitations associated to the Hurricane Otto (category 3) just a few weeks after (November, 2016).

Hurricane Otto passing left roughly 300 mm of rain over the volcano. Using a general linear regression model (GLM), it was possible to characterize the interactions among the parameters influencing landslides (epicenter distance, precipitation, altimetry, and slope).

The cascading 2016 disaster caused 942 mass movements (Figure 1). 62% of them occurred between 3 to 6 km from the prior epicenter and in the E, SE, and S slopes of Miravalles volcano where local faults density concentrate, and precipitation summed maximum values throughout the cyclone. The GLM validates a combined earthquake-hurricane coupling with greater massmovements densities near the epicenter, at zones with greater rainfall totals, steep and higher regions.



**Figure 1.** Debris flows and landslides generated by Hurricane Otto over Miravalles volcano.

The application of Sentinel-1 synthetic aperture radar and WorldView-3 and -4 images helped to map the flooded areas derived by Hurricane Otto in Upala municipality (Figure 3). Debris flows impacted roughly 27 km<sup>2</sup> (Figure 2) and moved down the slopes as flash floods in approximately 74 km<sup>2</sup> (Figure 4), with eight casualties in the vicinity of the Miravalles volcano and roughly 10 million US\$ of economic impacts in Bagaces and Upala municipalities.

### 3.3. Botanical evidence, hydrological, and disaster risk assessments

The Térraba catchment in central-south has the bigger area and peak discharge records in Costa Rica with 4765 km<sup>2</sup>. Seven random sample places along the catchment were used to reconstruct the peak discharge of a recent tropical cyclone (Tropical Storm Nate, 2017) employing botanical evidence, especially scars on the trees (Figure 5). Interestingly, trees on cut banks or terraces have minimal uncertainties among observed and modeled heights of flows, not in straight channel reaches (Figure 6).



**Figure 2.** a) Flights over Miravalles volcano following the cyclone. b) Mass movements on Miravalles volcano NE slope. c) Large blocks and wood moved along the NE volcano slope. d) The debris flows produced four casualties and immense economic losses.

In the second phase, the regional flood-frequency analyses were performed. The study combined a dendrochronology assessment and peak discharge calculation to obtain flood return periods. These return periods were merged with the Topographic Wetness Index (TWI) to ascertain regional flood hazards throughout riverbeds and surrounding areas. Flood exposure was determined using the population and infrastructure density. Flood

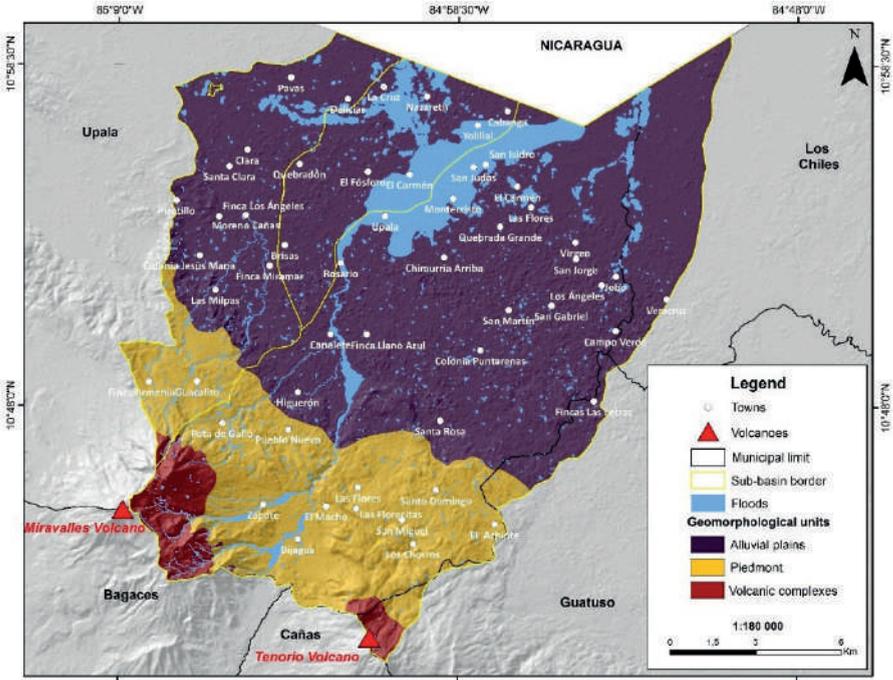


Figure 3. Geomorphological units and Hurricane Otto flash floods in Upala municipality.

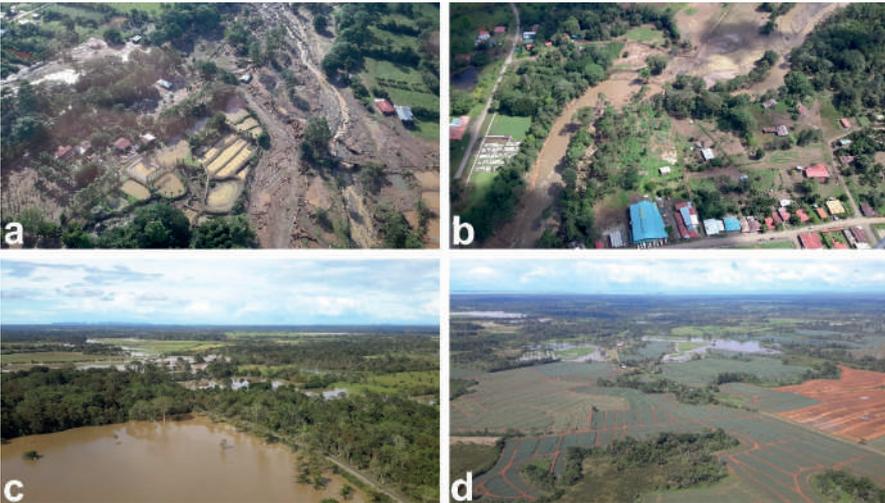


Figure 4. Flights over Upala after the passing Hurricane Otto. Debris flows and flash floods carried large wood (a). Downstream the floodplains spread out (b). Rice and pineapple croplands, and forest/wetlands fragmented areas were the most flooded areas (c, d).



**Figure 5.** Successive inlet modeled discharges using historical extremes, dendrogeomorphology, and a two-dimensional hydrodynamic model to calculate peak discharges.

vulnerability was based on the social development index (IDS, 2017) which merges fourteen socioeconomic parameters nationally (MIDE-PLAN, 2017).

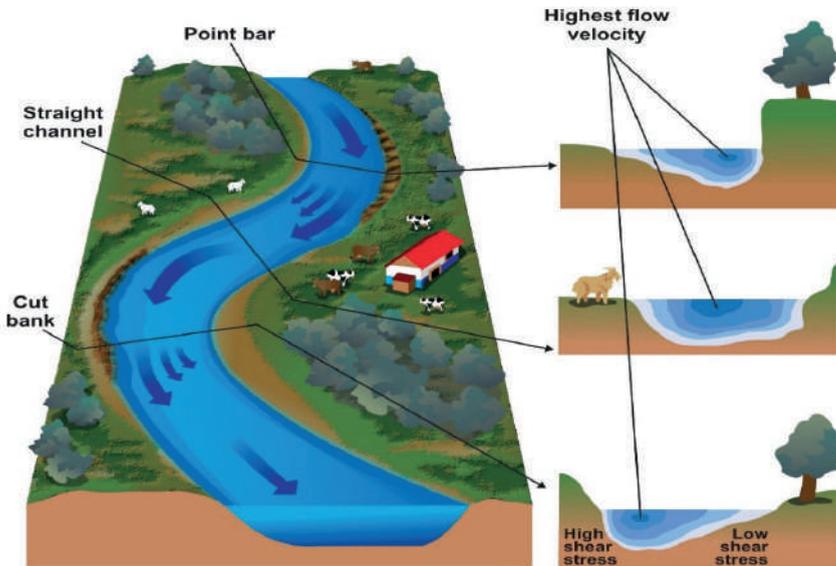
The highest risk values are distributed throughout the catchment in confined sites but mainly located in General, Unión, Pejibaye, Ceibo, and Limón catchments, which are very populated, less favored, or indigenous regions. Medium and low risk results responded to less populated catchments, mainly agricultural areas such as Pacuar, some parts of Volcán, General, and Coto Brus. The transdisciplinary approaches combination proved useful in the scarce-information Térraba catchment and about 6000 people live in loading risky areas (Figure 7).

## 4. Discussion

### 4.1. Monitoring earthquake-cyclones interaction regions

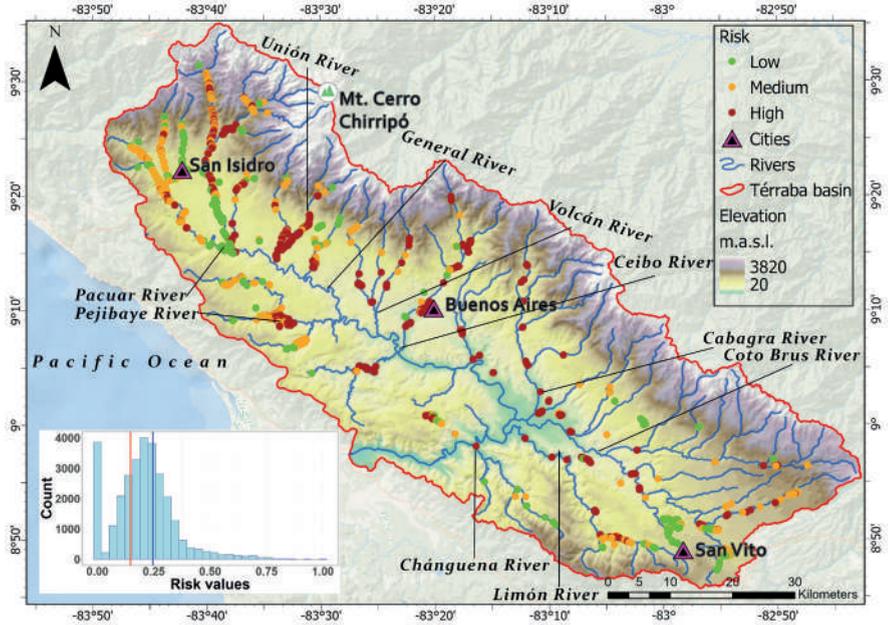
The consequent occurrence of earthquakes and extraordinary hydrometeorological events trigger compound and amplified disasters

(Wallemacq & House, 2018). Central American tectonic dynamics make this region remarkably vulnerable to mass movements (Alvarado *et al.*, 2017). Moreover, high weathering and wet soils conditions are ideal for earthquake-induced landslides (Bommer & Rodríguez, 2002). In addition, high precipitation in Central America triggers several landslides every year. Consequently, the isthmus has a very high link among mean daily rainfall totals and mean daily landslides worldwide (Froude & Petley, 2018). Therefore, a good recommendation is to monitor earthquake previously affected regions during subsequent extraordinary rainfall events (Piciullo *et al.*, 2018).



**Figure 6.** Tree's geomorphic location controls the uncertainties among observed (scars) and calculated peak discharge. Uncertainties are lower on stable fluvial landforms such as point bars, terraces, and cut banks.

Large wood on debris-flows generated critical impacts on infrastructure during the Hurricane Otto. Tropical conditions promote great wood decay and therefore catchments can transport high capacity of trunks linked with large peak discharge (Cadot *et al.*, 2009; Wohl *et al.*, 2017). Hence, large wood is a risk enhancer of infrastructure damage, block river channels, and intensify floods (Ruiz-Villanueva *et al.*, 2016). An extraordinary number of large wood pieces were withdrawn from the channel network around Miravalles volcano days after the event.



**Figure 7.** Flood risk determination for the Térraba catchment at central-south Costa Rica.

**4.2. Tropical dendrogeomorphic peak discharge calculation reliability**

The use of UAV photogrammetry can generate high-resolution orthoimages which can reduce topography uncertainties. This information is key to produce good digital surface models and precise hydraulic models. The study results are even similar or lower than temperate regions such as Poland (Ballesteros-Cánovas *et al.*, 2016), United States (Yanosky & Jarrett, 2002), Canada (Gottesfeld, 1996), Spain (Ballesteros-Cánovas *et al.*, 2011a, b; Victoriano *et al.*, 2018), Canary Islands (Garrote *et al.*, 2018), or Bhutan (Speer *et al.*, 2019).

The trees located on point bars and straight channels are impacted by higher flow velocities and Froude numbers in the hydraulic model. For future assessments, to significantly reduce the time in dendrogeomorphic sampling and to enhance results is compulsory to use more stable landforms such as cut banks and alluvial terraces. These results were consistent with previous studies (Ballesteros-Cánovas, 2011a; Gottesfeld, 1996; Yanosky & Jarret, 2002; Victoriano *et al.*, 2018).

**4.3. Are disaster risk assessments possible in scarce-data countries?**

Regional flood risk assessments in large scale geomorphic units are achievable using a group of general (systematic hydrological data, socioeconomic indexes) and high-resolution inputs (UAV images, hydraulic models, detailed population density data). Térraba catchment most inhabitants are considered to live in

rural settings and associated with agriculture (INEC, 2020). Community capital and spatial variability define rural areas disaster resilience (Cutter *et al.*, 2016). Communities closer to urban centers have an improved capacity dealing with flooding (Jamshed *et al.*, 2020). Moreover, developing countries' rural areas are extremely vulnerable to disasters. Furthermore, its vulnerability responds with high migration levels, dispersed benefit from social protection programs, and scarcer or no savings to soft the impacts (Deria *et al.*, 2020). Additionally, Térraba catchment comprise numerous indigenous territories that should be evaluated by their knowledge and cultural characteristics (Kelman *et al.*, 2012). Therefore, rural, and indigenous revenues rely on livelihood assets surrounded by vulnerable or protected ecosystems (UNDRR, 2019). Therefore, developing countries' lower income households in rural are greatly affected by the impact of disasters (Jakobsen, 2012; Arouri *et al.*, 2015). For instance, public policies such as poverty reduction, territorial planning, and environmental management should be primary instruments governing disaster risks (Lavell & Maskrey, 2014).

## 5. Conclusions

This research found a set of future research lines for natural hazards and dendrochronology in Costa Rica and the tropics. The study of hydrogeomorphic processes can be improved through the creation of higher-resolution baseline data, especially also in terms of better imagery (e.g., satellite, airborne, drones, LiDAR) and more intensive fieldwork to generate better geomorphic maps and statistical modelling to develop suitable natural hazard assessments and zonation. Previously affected mountain regions by earthquakes must be monitored in extraordinary precipitation events to anticipate further disasters. Areas where mass movements generated by earthquakes and subsequent strong rainfall events can be triggered are necessary to be studied to minimize casualties and losses in developing countries. Flood-frequency analyses with dendrogeomorphic estimations and hydrological measurements can be precisely used to calculate cyclone-induced peak discharges and floods. Coarse and detailed data can be useful implementing regional flood risk evaluations in large-scale catchments. A regional flood-frequency approach in parallel with dendrogeomorphology and risk assessment is a practical contribution for territorial planning strengthening the resilience of tropical catchments populations. This multidisciplinary procedure can be employed in countries where hydrological reference information is limited.

## References

- Allen, S. K., Ballesteros-Canovas, J., Randhawa, S. S., Singha, A. K., Huggel, C., & Stoffel, M. (2018). Translating the concept of climate risk into an assessment framework to inform adaptation planning: Insights from a pilot study of flood risk in Himachal Pradesh, Northern India. *Environmental science & policy*, 87, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.05.013>

- Alvarado, G. E., Benito, B., Staller, A., Climent, A., Camacho, E., Rojas, W., Marroquín, G., Molina, E., Talavera, J. E., Martínez-Cuevas, S., & Lindholm, C. (2017). The new Central American seismic hazard zonation: mutual consensus based on up to day seismotectonic framework. *Tectonophysics*, 721, 462-476.  
<https://doi.org/10.1016/j.tecto.2017.10.013>
- Alvarado, G. E. (2021). *Costa Rica y sus volcanes*. San José, Costa Rica: EUCR, EUNA, ETCR.
- Amador, J. A., Alfaro, E. J., Rivera, E. R., & Calderón, B. (2010). Climatic features and their relationship with tropical cyclones over the Intra-Americas seas. In *Hurricanes and climate change*, 149-173. Springer, Dordrecht.  
[https://doi.org/10.1007/978-90-481-9510-7\\_9](https://doi.org/10.1007/978-90-481-9510-7_9)
- Arouri, M., Nguyen, C., & Youssef, A. B. (2015). Natural disasters, household welfare, and resilience: evidence from rural Vietnam. *World development*, 70, 59-77.  
<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2014.12.017>
- Ballesteros, J. A., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Sanchez-Silva, M., & Stoffel, M. (2011). Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharge based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *Journal of Hydrology*, 403(1-2), 103-115. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.045>
- Ballesteros Canovas, J. A., Eguibar, M., Bodoque, J. M., Díez-Herrero, A., Stoffel, M., & Gutiérrez-Pérez, I. (2011). Estimating flash flood discharge in an ungauged mountain catchment with 2D hydraulic models and dendrogeomorphic palaeostage indicators. *Hydrological Processes*, 25(6), 970-979.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.7888>
- Ballesteros-Cánovas, J. A., Stoffel, M., Spyt, B., Janecka, K., Kaczka, R. J., & Lempa, M. (2016). Paleoflood discharge reconstruction in Tatra Mountain streams. *Geomorphology*, 272, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.004>
- Bommer, J. J., & Rodríguez, C. E. (2002). Earthquake-induced landslides in Central America. *Engineering Geology*, 63(3-4), 189-220.  
[https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(01\)00081-3](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(01)00081-3)
- Cadol, D., Wohl, E., Goode, J. R., & Jaeger, K. L. (2009). Wood distribution in neo-tropical forested headwater streams of La Selva, Costa Rica. *Earth Surface Processes and Landforms*, 34(9), 1198-1215. <https://doi.org/10.1002/esp.1800>
- Campos-Durán, D. F., & Quesada-Román, A. (2017). Impacto de los eventos hidrometeorológicos en Costa Rica, periodo 2000-2015. *Geo Uerj*, (30), 440-465.  
<https://doi.org/10.12957/geouerj.2017.26116>
- Carrión-Mero, P., Montalván-Burbano, N., Morante-Carballo, F., Quesada-Román, A., & Apolo-Masache, B. (2021). Worldwide research trends in landslide science. *International journal of environmental research and public health*, 18(18), 9445.  
<https://doi.org/10.3390/ijerph18189445>
- Castillo, R., & Amador, J. A. (2020). Precipitation and Temperature in Costa Rica at the End of the Century Based on NEX-GDDP Projected Scenarios. *Atmosphere*, 11(12), 1323. <https://doi.org/10.3390/atmos11121323>
- Cutter, S. L., Ash, K. D., & Emrich, C. T. (2016). Urban-rural differences in disaster resilience. *Annals of the American Association of Geographers*, 106(6), 1236-1252.  
<https://doi.org/10.1080/24694452.2016.1194740>
- Denyer, P., & Alvarado, G. E. (2007). *Mapa geológico de Costa Rica*. Escala 1:400 000. Librería Francesa. San José, Costa Rica.
- Deria, A., Ghannad, P., & Lee, Y. C. (2020). Evaluating implications of flood vulnerability factors with respect to income levels for building long-term disaster resilience

- of low-income communities. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 48, 101608. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101608>
- Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), 2161-2181. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018>
- Garrote, J., Díez-Herrero, A., Génova, M., Bodoque, J. M., Perucha, M. A., & May-er, P. L. (2018). Improving flood maps in ungauged fluvial basins with dendrogeomorphological data. An example from the Caldera de Taburiente National Park (Canary Islands, Spain). *Geosciences*, 8(8), 300. <https://doi.org/10.3390/geosciences8080300>
- Goldenberg, S. B., Landsea, C. W., Mestas-Nuñez, A. M., & Gray, W. M. (2001). The recent increase in Atlantic hurricane activity: Causes and implications. *Science*, 293 (5529), 474-479. <https://doi.org/10.1126/science.1060040>
- Gottesfeld, A. S., & Gottesfeld, L. M. J. (1990). Floodplain dynamics of a wandering river, dendrochronology of the Morice River, British Columbia, Canada. *Geomorphology*, 3(2), 159-179. [https://doi.org/10.1016/0169-555X\(90\)90043-P](https://doi.org/10.1016/0169-555X(90)90043-P)
- Hettig, E., Lay, J., & Sipangule, K. (2016). Drivers of households' landuse decisions: A critical review of micro-level studies in tropical regions. *Land*, 5 (4), 32. <https://doi.org/10.3390/land5040032>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos. (2020). *National Population Projections for 2020 based on 2011 National Census*. San José, Costa Rica. Available on <https://www.inec.cr/poblacion/estimaciones-y-proyecciones-de-poblacion>
- Jakobsen, K. T. (2012). In the eye of the storm—The welfare impacts of a hurricane. *World Development*, 40(12), 2578-2589. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2012.05.013>
- Jamshed, A., Birkmann, J., Rana, I. A., & Feldmeyer, D. (2020). The effect of spatial proximity to cities on rural vulnerability against flooding: An indicator based approach. *Ecological indicators*, 118, 106704. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106704>
- Kirschbaum, D., Stanley, T., & Zhou, Y. (2015). Spatial and temporal analysis of a global landslide catalog. *Geomorphology*, 249, 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.016>
- Kelman, I., Mercer, J., & Gaillard, J. C. (2012). Indigenous knowledge and disaster risk reduction. *Geography*, 97(1), 12-21. <https://doi.org/10.1080/00167487.2012.12094332>
- Kundzewicz, Z. W., Krysanova, V., Benestad, R. E., Hov, Ø., Piniewski, M., & Otto, I. M. (2018). Uncertainty in climate change impacts on water resources. *Environmental Science & Policy*, 79, 1-8. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.008>
- LA RED (2022). *DesInventar-Inventory system of the effects of disasters*. Corporación OSSA, Cali, Colombia. Available at: <http://desinventar.org>,
- Lavell, A., & Maskrey, A. (2014). The future of disaster risk management. *Environmental Hazards*, 13(4), 267-280. <https://doi.org/10.1080/17477891.2014.935282>
- Lin, L., Lin, Q., & Wang, Y. (2017). Landslide susceptibility mapping on a global scale using the method of logistic regression. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17(8), 1411-1424. <https://doi.org/10.5194/nhess-17-1411-2017>
- Marshall, J. (2007). The Geomorphology and Physiographic Provinces of Central America. In: Bundschuh, J., Alvarado, G E. (Eds.). *Central America: Geology, Resources and Hazards*. Taylor & Francis. p. 1436.

- MIDEPLAN - Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (2017). *Índice de Desarrollo Social 2017*. San José, Costa Rica. p. 126.
- Mitchell, D., Enemark, S., & Van Der Molen, P. (2015). Climate resilient urban development: Why responsible land governance is important. *Land Use Policy*, 48, 190-198. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2015.05.026>
- National Oceanic and Atmospheric Administration. (2022). *El Niño and La Niña years and intensities based on Oceanic Niño Index (ONI)*. [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)
- Noy, I. (2009). The macroeconomic consequences of disasters. *Journal of Development economics*, 88(2), 221-231. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2008.02.005>
- Peel, M. C., Finlayson, B. L., & McMahon, T. A. (2007). Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and earth system sciences*, 11(5), 1633-1644. <https://doi.org/10.5194/hess-11-1633-2007>
- Piciullo, L., Calvellido, M., & Cepeda, J. M. (2018). Territorial early warning systems for rainfall-induced landslides. *Earth-Science Reviews*, 179, 228-247. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2018.02.013>
- Pinos, J., & Quesada-Román, A. (2021). Flood risk-related research trends in Latin America and the Caribbean. *Water*, 14(1), 10. <https://doi.org/10.3390/w14010010>
- Quesada-Román, A., Fallas-López, B., Hernández-Espinoza, K., Stoffel, M., & Ballesteros-Cánovas, J. A. (2019). Relationships between earthquakes, hurricanes, and landslides in Costa Rica. *Landslides*, 16(8), 1539-1550. <https://doi.org/10.1007/s10346-019-01209-4>
- Quesada-Román, A., & Pérez-Briceño, P. M. (2019). Geomorphology of the Caribbean coast of Costa Rica. *Journal of maps*, 15(2), 363-371. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1600592>
- Quesada-Román, A., Pérez-Umaña, D., 2020. State of the Art of Geodiversity, Geoconservation, and Geotourism in Costa Rica. *Geosciences*, 10(6), 211. <https://doi.org/10.3390/geosciences10060211>
- Quesada-Román, A., & Villalobos-Chacón, A. (2020). Flash flood impacts of Hurricane Otto and hydrometeorological risk mapping in Costa Rica. *Geografisk Tidsskrift-Danish Journal of Geography*, 120(2), 142-155. <https://doi.org/10.1080/00167223.2020.1822195>
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Granados-Bolaños, S., Birkel, C., & Stoffel, M. (2020a). Dendrogeomorphic reconstruction of floods in a dynamic tropical river. *Geomorphology*, 359, 107133. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107133>
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Guillet, S., Madrigal-González, J., & Stoffel, M. (2020b). Neotropical *Hypericum irazuense* shrubs reveal recent ENSO variability in Costa Rican páramo. *Dendrochronologia*, 61, 125704. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2020.125704>
- Quesada-Román, A., Villalobos-Portilla, E., & Campos-Durán, D. (2021c). Hydrometeorological disasters in urban areas of Costa Rica, Central America. *Environmental Hazards*, 20(3), 264-278. <https://doi.org/10.1080/17477891.2020.1791034>
- Quesada-Román, A. (2021). Landslide risk index map at the municipal scale for Costa Rica. *International journal of disaster risk reduction*, 56, 102-144. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102144>

- Quesada-Román, A. (2022). Flood risk index development at the municipal level in Costa Rica: A methodological framework. *Environmental Science & Policy*, 133, 98-106. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.012>
- Quesada-Román, A., Ballesteros-Cánovas, J. A., Granados-Bolaños, S., Birkel, C., & Stoffel, M. (2022). Improving regional flood risk assessment using flood frequency and dendrogeomorphic analyses in mountain catchments impacted by tropical cyclones. *Geomorphology*, 396, 108000. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.108000>
- Ruiz-Villanueva, V., Piégay, H., Gurnell, A. M., Marston, R. A., & Stoffel, M. (2016). Recent advances quantifying the large wood dynamics in river basins: New methods and remaining challenges. *Reviews of Geophysics*, 54(3), 611-652. <https://doi.org/10.1002/2015RG000514>
- Segoni, S., Piciullo, L., & Gariano, S. L. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides*, 15(8), 1483-1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>
- Shi, P. & Karsperson, R. (2015). World atlas of natural disaster risk. Heidelberg: Springer.
- Sidle, R. C., Gomi, T., Usuga, J. C. L., & Jarihani, B. (2017). Hydrogeomorphic processes and scaling issues in the continuum from soil pedons to catchments. *Earth-Science Reviews*, 175, 75-96. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.10.010>
- Sidle, R. C., & Onda, Y. (2004). Hydrogeomorphology: overview of an emerging science. *Hydrological processes*, 18(4), 597-602. <https://doi.org/10.1002/hyp.1360>
- Speer, J. H., Shah, S. K., Truettner, C., Pacheco, A., Bekker, M. F., Dukpa, D., Cook, E. J., Tenzin, K. (2019). Flood History and River Flow Variability Recorded in Tree Rings on the Dhur River, Bhutan. *Dendrochronologia*, 56, 125605. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2019.125605>
- Sun, C., Kucharski, F., Li, J., Jin, F. F., Kang, I. S., & Ding, R. (2017). Western tropical Pacific multidecadal variability forced by the Atlantic multidecadal oscillation. *Nature Communications*, 8(1). <https://doi.org/10.1038/ncomms15998>
- Stoffel, M., & Bollschweiler, M. (2008). Treering analysis in natural hazards research: an overview. *Natural hazards and earth system sciences*, 8(2), 187-202. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-187-2008>
- Stoffel, M., & Wilford, D. J. (2012). Hydrogeomorphic processes and vegetation: disturbance, process histories, dependencies and interactions. *Earth Surface-Processes and Landforms*, 37(1), 9-22. <https://doi.org/10.1002/esp.2163>
- Stoffel, M., Butler, D. R., & Corona, C. (2013). Mass movements and tree rings: A guide to dendrogeomorphic field sampling and dating. *Geomorphology*, 200, 106-120. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.017>
- Stoffel, M., & Corona, C. (2014). Dendroecological dating of geomorphic disturbance in trees. *Treering research*, 70(1), 3-2. <https://doi.org/10.3959/1536-1098-70.1.3>
- Syvitski, J. P., Cohen, S., Kettner, A. J., & Brakenridge, G. R. (2014). How important and different are tropical rivers?—An overview. *Geomorphology*, 227, 5-17. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.02.029>
- Tatem, A. J. (2017). WorldPop, open data for spatial demography. *Scientific data*, 4(1), 1-4. <https://doi.org/10.1038/sdata.2017.4>
- UNDRR (United Nations Disaster Risk Reduction) (2019). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Geneva, Switzerland.

- UNISDR (United Nations Disaster Risk Reduction) (2009). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*. United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). Geneva, Switzerland.
- Victoriano, A., Díez-Herrero, A., Génova, M., Guinau, M., Furdada, G., Khazaradze, G., & Calvet, J. (2018). Fourtopic correlation between flood dendrogeomorphological evidence and hydraulic parameters (the Portainé stream, Iberian Peninsula). *Catena*, 162, 216-229. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.11.009>
- Wallemacq, P., & House, R. (2018). *Economic losses, poverty & disasters*. Centre for Research on the Epidemiology of Disasters and United Nations Office for Disaster Risk Reduction. Geneva, Switzerland. pp (1-30).
- Wohl, E. (2006). Human impacts to mountain streams. *Geomorphology*, 79(3-4), 217-248. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.020>
- Wohl, E., Barros, A., Brunzell, N., Chappell, N. A., Coe, M., Giambelluca, T., Goldsmith, S., Harmon, R., Hendrickx, J. M. H., Juvik, J., McDonnell, J., Ogden, F. (2012). The hydrology of the humid tropics. *Nature Climate Change*, 2(9), 655-662. <https://doi.org/10.1038/nclimate1556>
- Wohl, E., Lininger, K. B., Fox, M., Baillie, B. R., & Erskine, W. D. (2017). Instream large wood loads across bioclimatic regions. *Forest Ecology and Management*, 404, 370-380. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.013>
- Yanosky, T. M. & Jarrett, R. D. (2002). Dendrochronologic evidence for the frequency and magnitude of paleofloods. In: House, P. K., Webb, R. H, Baker, V. R. et al. (eds) *Ancient Floods, Modern Hazards: Principles and applications of paleoflood hydrology*. Water Science and Application vol. 5. Washington, D.C.: American Geophysical Union, pp. 77-89.



# Relaciones entre la estructura urbana y la movilidad cotidiana en Ciudad Juárez, Chihuahua, México

Relations between urban structure and daily mobility in Ciudad Juárez, Chihuahua, Mexico

Isaac Chaparro Hernández<sup>1</sup>

*Recibido 8 de agosto de 2022; aceptado 24 de septiembre de 2022*

## RESUMEN

La investigación describe y explica los patrones, costos y límites de la movilidad cotidiana causados por la estructura urbana de Ciudad Juárez. La concatenación de las teorías clásicas y contemporáneas de localización, estructura urbana y movilidad fundamentaron los procesos de análisis y resultados de este estudio. Metodológicamente se implementaron las técnicas de autocorrelación espacial I de Moran y G de Getis-Ord para el análisis de los censos económicos del INEGI, que identificaron espacialmente los subcentros de empleo total, manufactura y terciario en los periodos 1993, 2004, 2009 y 2014. Por otro lado, se realizó un levantamiento bietápico de datos en toda la ciudad por medio de encuestas origen-destino, las cuales mostraron, desde una escala macro, los patrones de movilidad en términos de tiempo, distancia, orígenes, destinos, cantidad de viajes, preferencias de transporte, motivos, edades y costos económicos. En una escala micro, la teoría de grafos y el análisis de redes permitieron modelar espacialmente cada viaje intraurbano, los resultados se detallan en un Atlas de Movilidad que incluye cada una de las 64 unidades territoriales en que se dividió la ciudad. La investigación propone una metodología replicable, además provee información relevante y actual de la ciudad, útiles para otros estudios, toma de decisiones y políticas públicas de estructuración y movilidad urbana.

*Palabras clave: Movilidad urbana, patrones de movilidad, estructura urbana, autocorrelación espacial.*

1 Universidad Autónoma de Ciudad de Juárez, México, correo electrónico: isaac.chaparro@uacj.mx ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6448-4433>

## ABSTRACT

The research describes and explains the patterns, costs and limits of daily mobility caused by the urban structure of Ciudad Juárez. The concatenation of classical and contemporary theories of location, urban structure and mobility underpinned the analysis processes and results of this study. Methodologically, Moran's I and Getis-Ord's G spatial autocorrelation techniques were implemented for the analysis of INEGI's economic censuses, which spatially identified the sub-centers of total, manufacturing and tertiary employment in the periods 1993, 2004, 2009 and 2014. On the other hand, a two-stage data survey was conducted throughout the city by means of origin-destination surveys, which showed, from a macro scale, mobility patterns in terms of time, distance, origins, destinations, number of trips, transportation preferences, motives, ages and economic costs. At a micro scale, graph theory and network analysis allowed spatial modeling of each intra-urban trip, the results of which are detailed in a Mobility Atlas that includes each of the 64 territorial units into which the city was divided. The research proposes a replicable methodology and provides relevant and current information about the city, useful for other studies, decision making and public policies on urban structuring and mobility.

*Key words: Urban mobility, mobility patterns, urban structure, spatial autocorrelation.*

## 1. Introducción

Por su naturaleza, las dinámicas urbanas modernas son amplias y complejas, desde entender la organización espacial de actividades, hasta el movimiento de personas y bienes dentro de la misma ciudad. Por tal motivo, se debería enfocar cualquier estudio a explorar, caracterizar y explicar los subcentros urbanos, para dejar de producir discusiones que se centran en temas y resultados estancados desde hace mucho tiempo (Garrocho & Campos, 2007). Por tal motivo, el propósito de esta investigación es conocer la relación que genera la estructura urbana de la ciudad con la movilidad cotidiana de las personas, entendido desde los costos y límites que conlleva desplazarse por las vialidades existentes, para llegar a lugares específicos y solventar necesidades como el trabajo, la educación, salud, adquirir productos, servicios, entre otros. La importancia de este estudio no es sólo definir el vínculo entre la distribución de servicios en la ciudad con los desplazamientos urbanos, sino explicar y reflexionar los efectos, desde una perspectiva individual por parte del usuario que viaja, así como desde una escala mayor para ser considerado en la toma de decisiones y en la generación de política pública.

Es claro que existe una relación proporcional entre la población concentrada y el costo de la movilidad (Gakenheimer, 1998). En el contexto de Ciudad Juárez, dicha relación se manifiesta con el 151.6% de expansión de la mancha urbana y un crecimiento de población de 64.6% de 1990 al 2015 (López & Peña, 2017). También la distribución de la industria maquiladora a partir de la década de 1960, que como dato reciente, desde el 2015 al 2017 ha crecido 5%, incluso el parque de vehículos motorizados registrados en circulación también se ha

incrementado 10.7% en el mismo periodo (Plan Estratégico de Juárez, A.C, 2018). Estos fenómenos en crecimiento hacen una estructura urbana dinámica, que necesita ser explorada y caracterizada. En este sentido, dicha reestructuración va de la mano con los costos de congestión, por lo que también los patrones de movilidad cotidiana cambian, pero no pueden ser analizados por la ausencia de información actualizada.

Por lo anterior, se establecieron los siguientes objetivos específicos: El primero buscó identificar las áreas más importantes de empleo, lo que definirá en mayor medida la estructura actual de la ciudad. Para este objetivo, se analizaron los censos económicos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) con las técnicas de dependencia espacial. El segundo objetivo es determinar los patrones, costos y límites de la movilidad cotidiana, con datos adquiridos por medio de encuestas origen-destino a nivel vivienda aplicadas en toda la ciudad, y analizados con estadística tradicional y sistemas de información geográfica. Por último, definir un modelo que combine la estructura urbana y la movilidad, construido con la sobreposición de resultados.

El antecedente del problema surge a partir de la competencia del mercado por las mejores localizaciones, la centralidad ha sido la razón principal que reorganiza los centros económicos (Alegría, 1989). Desde el enfoque de los estudios urbanos, no hay evidencia para rechazar la hipótesis acerca de que existe una limitación en la movilidad cotidiana provocada por los costos de congestión causados por la estructura urbana, considerando la teoría de localización como vínculo entre ambas esferas.

Otro problema fundamental es la poca o restringida información de movilidad en la ciudad, incluso la actualización, frecuencia y profundidad de los datos recabados por instituciones, se consideran parte de la problemática, debido a que podría ser un insumo importante que también describiría la estructura urbana, sus dinámicas económicas y la interacción interna. Los efectos de desconocer los patrones de desplazamientos intraurbanos se materializan en una movilidad restringida, y puede ser abordado como una restricción de los derechos humanos para los habitantes de la ciudad (Borja, 2013), en el sentido que todos los costos que absorbe el usuario, han deteriorado las condiciones de la vida cotidiana de la población en general. Respecto a lo anterior, la Comisión de Derechos Humanos del Distrito Federal define el término derecho a la movilidad como: “el derecho de toda persona y de la colectividad a disponer de un sistema integral de movilidad de calidad y aceptable, suficiente y accesible que, en condiciones de igualdad y sostenibilidad, permita el efectivo desplazamiento de todas las personas en un territorio para la satisfacción de sus necesidades y pleno desarrollo” (Comisión Nacional de los Derechos Humanos, 2016, p. 3). Sin duda, la reflexión acerca de la situación actual de la movilidad urbana favorecerá a mejorar las estrategias de planeación y de inversión para un beneficio social.

## 2. Antecedentes

Las teorías de estructura urbana, así como las de localización, tienen un vínculo fundamental con los procesos económicos, cambiantes por la forma de mercantilización de bienes y servicios dependiendo del continente, país o ciudad con su característica propia de sustentabilidad económica. Los modelos clásicos que provienen de Europa y Estados Unidos, tienen aportaciones que dan origen a los cimientos para intentar identificar patrones de empleo y de movilidad. En comparación de los procesos de cambio que experimentan las ciudades europeas o norteamericanas, en Latinoamérica presentan una mayor rapidez de crecimiento y expansión territorial (Ford, 1996), escenario constante sobre todo en las zonas metropolitanas de México.

### 2.1 Modelos de estructura urbana en América Latina

Históricamente las ciudades han evolucionado por lo que es factible hacer una revisión en lapsos de tiempo, (Borsdorf, 2003) hace precisamente un comparativo de la estructura urbana desde la colonización hasta la era moderna con características de fragmentación. Los estudios en Latinoamérica han sido abordados por investigadores europeos que han mostrado interés en comprender la configuración y evolución de las estructuras urbanas. Específicamente se han elaborado en países como Chile (Meyer & Bähr, 2004) y Argentina (Janoschka, 2002), sin embargo, es de interés abordar investigaciones en México y observar si existe alguna relación con los modelos generales de Latinoamérica, los estadounidenses de la Escuela de Chicago o los europeos.

En México se han hecho investigaciones de estructuras urbanas en áreas metropolitanas, con mayor frecuencia en la Ciudad de México, los ejemplos más relevantes son de Aguilar y Alvarado (2004), donde se discute si la ciudad tiene o tendrá una composición multinodal. Graizbord (2008) define la estructura de la misma ciudad por medio de análisis de movilidad urbana. También los análisis de reestructuración y organización de los centros de servicios (Sobrino, 2006) y el análisis de accesibilidad, ingreso y localización residencial (Suárez & Delgado, 2007). Incluso el área metropolitana de Toluca ha tenido interesantes investigaciones referentes a este tema, se distingue la investigación de (Garrocho & Campos, 2007) donde profundizan y proponen alternativas metodológicas para discutir y estudiar la estructura urbana.

El estudio de la estructura urbana en Ciudad Juárez, es relativamente nuevo. Las primeras investigaciones describen los cambios históricos desde la década de 1950. En 1994 ya se discutía la transición de monocéntrica a multicéntrica de la estructura del empleo en la ciudad (Fuentes C., 2001, p. 105). Finalmente, la más reciente investigación de estructura urbana en la ciudad fue de Fuentes y Hernández (2015), donde hacen una identificación de los subcentros de empleo en el periodo de 1994 al 2004.

## 2.2 Estudios de movilidad cotidiana

Una de las herramientas para conocer a detalle los patrones de movilidad y a su vez la demanda de los diferentes tipos de transporte son las encuestas origen-destino (Casado, 2008), con la característica particular del alto costo, motivo fuerte por el cual existe escasa información (INEGI, 2017). En un contexto internacional, estudios relevantes de movilidad con esta metodología se encuentra en países como Chile con el proyecto de EOD Santiago 2012 (Universidad Alberto Hurtado, 2012), y España con el proyecto MOVILIA, desarrollado desde la década de los 80 dejó bases sólidas para el análisis de la movilidad obligada (Ministerio de Fomento del Gobierno de España, 2007).

Los países europeos han realizado este tipo de investigaciones con mayor frecuencia, Miralles-Guasch & Cebollada (2009) explican de forma resumida los siguientes proyectos: *National Travel Survey* en el Reino Unido; Suiza con el proyecto *Swiss Travel Survey*; En Alemania se desarrolla *Mobility in German*; Y Francia con *Enquêtes Ménages Déplacements*. Por otra parte en México está dentro de los países latinoamericanos con información significativa a nivel mundial (Miralles-Guasch & Cebollada, 2009). En la que destaca el INEGI y la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) con las encuestas origen-destino del Valle de México en el 2017. Por otra parte, han existido otras investigaciones en las que no participa el INEGI, como el caso de Puebla en 1976 y 1983, la Ciudad de México en 1979 y 1984, Monterrey en 1983, Guadalajara en 1985, Tampico-Madero-Altamira en 1998, San Luis Potosí en el 2000 y Distrito Federal en 2004 (Casado, 2008).

En Ciudad Juárez fue hasta mediados de 1992 en que se hizo un estudio vial y de transporte urbano formalmente por parte del Instituto Municipal de Investigación y Planeación (IMIP). No obstante, la información acerca de proyectos donde han utilizado encuestas origen-destino es muy poca. Se tienen datos acerca de una aplicación en 1997 y 2006 por parte del IMIP, con el objetivo de crear el plan de movilidad ciclista de Ciudad Juárez y el estudio integral de transporte 2006. La más reciente investigación de movilidad encontrada fue de Ortiz (2018), quien discute el impacto que ha ocasionado el BRT en términos de accesibilidad y percepción del usuario.

## 2.3 Modelos de localización

En la actualidad, los modelos y análisis de localización tienen referencias al modelo monocéntrico de Von Thünen (1826), quien recurrentemente es citado en los modernos estudios de la economía urbana, siendo los más significativos el de Wingo (1961) y Lowry (1964), pero con mayor relevancia por Alonso (1960, 1964) quien hace discusiones sobre los primeros estudios de la economía de la tierra urbana, he hizo modificaciones sustituyendo a los viajeros de cercanías por agricultores, y el DCN por una ciudad aislada (Fujita, 2012).

Los estudios más influyentes sobre la economía del uso de la tierra y la renta son de Ricardo (1821) y Von Thünen (1826). La teoría de Ricardo acerca de la renta de la tierra agrícola, se centra en la fertilidad y el suministro fijo de la tierra,

es decir, el valor de la tierra es proporcional a su producción. En contraste, la teoría de Von Thünen basa el valor de la renta de la tierra agrícola en la distancia del mercado. En este sentido, para efectos de esta investigación es relevante la segunda teoría debido a que participa la variable distancia (Parr, 2015), la cual puede ser vinculada con los estudios de movilidad urbana. Hotelling (1929) desde otra perspectiva considera la competencia de mercados, en el que las atracciones por parte de los compradores son afectadas por la localización y la distancia. Por el contrario, el modelo de Christaller (1966) se refiere a la conexión y relación interurbana.

Los estudios de Isard (1956), Beckman (1965) y Wingo (1961) prepararon las bases en las formulaciones respecto al modelo de Von Thünen, pero aplicado en el contexto urbano, emergiendo una nueva escuela llamada "nueva economía urbana" (Capello, 2011). Al entrar la era industrial, las zonas agrícolas ubicadas en zonas rurales tuvieron un equivalente industrial, que también buscaron optimizar sus costos de distribución de productos, por lo que la participación de Weber (1909) fue clave en la época. Por otra parte, Walter Isard (1949, 1956) buscó la relación que existe entre la localización de los sectores de producción con la zona de mercados, idea que lo postuló como un pionero en tratar el concepto del "costo del transporte" o el "problema del transporte" (Chang, 2004), con el que se busca la minimización de costos durante los flujos entre diferentes regiones.

## 2.4 Movilidad, distancia y fricción

La relación entre la estructura urbana, caracterizada por localizaciones de objetos de estudio, y el transporte tradicionalmente ha sido vista como causalidad, con una idea de que un concepto predetermina a otro (Cerdá & Marmolejo, 2010). Al profundizar Miralles-Guasch (2002) sostiene que la estructura física de la ciudad produce una demanda de movilidad, pero simultáneamente la oferta del transporte impacta en la localización de las actividades. Se observa desde las teorías de la localización cómo la distancia es un factor importante para encontrar una posición estratégica que beneficien las utilidades económicas para empresas e industrias, no obstante, este escenario es posible extenderlo hacia el hogar y la movilidad particular desde su localización.

En la revisión bibliográfica se encontraron estudios de ciudades desarrolladas, con alta densidad de población, problemas de movilidad y de contaminación, por ejemplo: Londres, Madrid, Ciudad de México (Rivas *et al.*, 2007), Perú, Chile, Nigeria, Tanzania, Tailandia y Colombia (Hidalgo D., 2005), Copenhague (Naess, 2006). Incluso en Ciudad Juárez se ha hecho este tipo de estudios por parte del IMIP y otras instituciones dedicadas al transporte (Ortega, 2016), también por académicos e investigadores se han desarrollado estudios de accidentes viales (Hernández, 2012) (Hernández-Hernández & De Haro-De León, 2014) (Hernández & Fuentes, 2014) y flujo vehicular de la industria (Avelar-Sosa *et al.*, 2014).

## 2.5 Movilidad cotidiana

El concepto ha cambiado con el paso del tiempo, sin dejar a un lado la esencia del movimiento de las personas de un lugar a otro abordado desde la etnología con el término de nómada. De manera general existen dos formas de realizar este tipo de investigaciones: la primera consiste en un análisis enfocado a la migración donde las personas cambian su lugar de residencia por largos periodos de tiempo; mientras que el segundo se concentra en movimientos repetitivos respecto a tiempos cortos y definidos, incluso se realizan varios desplazamientos en un mismo día, conocida como movilidad cotidiana (Zelinsky, 1971). Con lo anterior, es posible construir modelos de movilidad que permiten relacionar los modos de transporte cotidianos, tiempo, costo, motivos y horarios, dentro de una caracterización social (Miralles-Guasch & Cebollada, 2009).

Los métodos de análisis encontrados, tienen diferentes enfoques, donde destacan: la construcción y operación, que estudia la relación de los transportes, las rutas y las formas físicas de conexión, con énfasis en el costo de construcción, adecuación, mantenimiento y costos subsecuentes de operación (White, 1977). Otro método es el estudio de los principios conductistas de los usuarios en una operación vial, la cual incorpora teorías de toma de decisiones, oferta-demanda y psicosociales durante la ejecución de un viaje (Warner & Aberg, 2006) y (Morales-Soto *et al.*, 2010). Desde el enfoque histórico, que explica la expansión de los sistemas de transporte, vías terrestres, evolución económica y social en un tiempo prolongado (Tolley & Turton, 2013). Finalmente, los modelos o métodos cuantitativos incorporan estudios geográficos sobre el transporte, análisis de redes y buscan entender la forma y la complejidad del sistema con fundamento matemático y estadístico, con la posibilidad de crear simulaciones (Rodríguez M., 2000).

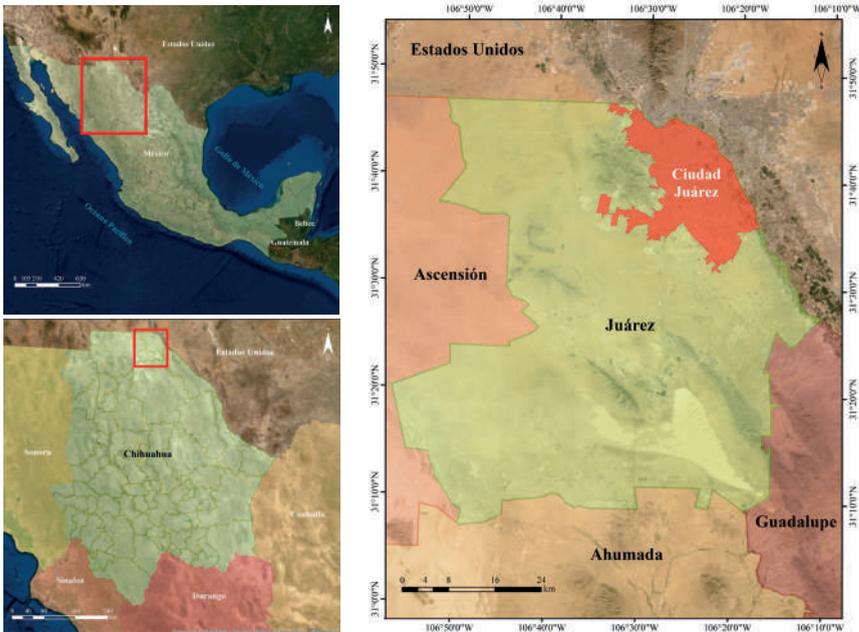
## 3. Metodología

Se propone una combinación de técnicas y métodos que no se han vislumbrado en otras investigaciones consultadas, por lo que se espera que uno de los aportes novedosos sea lo expuesto en este apartado. Cabe resaltar que las técnicas de análisis espacial, recopilación de información en campo y modelos se han utilizado por separado en investigaciones anteriores, por lo tanto, el fundamento original de cada procedimiento se mantiene, solo se ajustaron detalles para alcanzar los objetivos de este trabajo aplicado en el contexto de Ciudad Juárez.

### 3.1 Área de estudio

Ciudad Juárez es parte de la localidad de Juárez, tiene la concentración de población más grande del estado de Chihuahua con 1,391,180 habitantes según datos intercensales, donde el 99% de la población total del municipio está asentada en la zona urbana, además, a nivel nacional es la séptima zona metropolitana con mayor población (INEGI, 2015). Geográficamente se localiza

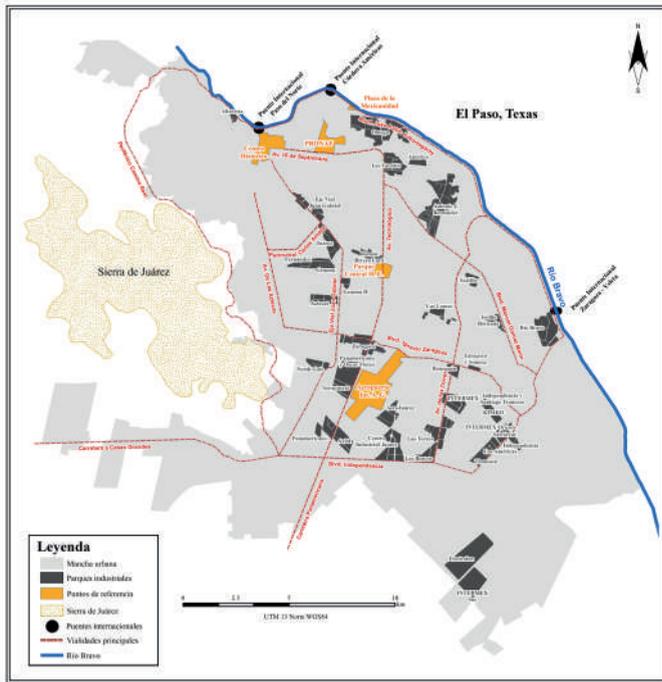
entre las coordenadas 106° 12' y 106° 16' de longitud oeste a 31° 30' y 31° 46' de latitud norte. Debido a la ubicación estratégica fronteriza, la ciudad colinda con los estados de Texas y Nuevo México de los Estados Unidos, delimitado por el Río Bravo (véase Figura 1). Debido a su posición geográfica binacional, Juárez cuenta con una composición económica en tres grandes sectores: el industrial con 59%, el comercio y servicios con 37%, y la construcción con 4% (Instituto Municipal de Investigación y Planeación, 2010), por lo que se deduce que Ciudad Juárez es industrializada, evidenciado con las 335 empresas manufactureras en funcionamiento durante el 2017 (Plan Estratégico de Juárez, A.C, 2018, p. 49).



**Figura 1.** Ubicación de Ciudad Juárez, Chihuahua, México.

Fuente: elaboración propia con información del INEGI (2015).

Desde la década de 1990 la expansión de la ciudad se vio acelerada hacia el suroriente debido a la localización de nuevas empresas maquiladoras y asentamientos de migrantes provenientes del sur de la república, el fenómeno provocó un crecimiento de la mancha urbana del 52%, es decir, de 233 km<sup>2</sup> en 1995 a 353 km<sup>2</sup> en el 2010 según datos del INEGI (1995, 2010), lo que ha ocasionado un aumento de distancias y tráfico que impacta en la movilidad cotidiana de los habitantes. También a partir de 1990 es notorio el incremento de más del doble del área urbana, influenciado por localización estratégica de nuevas empresas maquiladoras. Para el año 2017 existían 38 centros, áreas y parques industriales ubicados en intersecciones o vialidades primarias, que contenían 335 establecimientos y personal ocupado de 264,490, dedicados específicamente a la industria manufacturera, expuestos en la Figura 2.



**Figura 2.** Puntos de referencia y parques industriales de Ciudad Juárez.  
Fuente: elaboración propia.

Durante el 2018 en el contexto internacional, Ciudad Juárez se ubica en la posición 11 de mayor congestión vehicular en el país y el lugar 581 a nivel mundial, con una velocidad promedio por viaje de 40.2 km/h. En comparación con la Ciudad de México, la cual es la más congestionada del país y la tercera a nivel mundial, se observa una diferencia positiva de 20.9 km/h respecto a los 19.3 km/h en promedio que se invierte dentro de la capital del país, aunque en la comparación se deben considerar las diferencias entre ambas ciudades, como la cantidad de población, extensión territorial, actividad económica y la ubicación geográfica. Como dato relevante, Bogotá, Colombia, es la ciudad más congestionada del mundo con una velocidad de 14.5 km/h de viaje (INRIX, 2020). Para el 2015 se realizaban en el país cerca de 130 millones de viajes cotidianos, con tiempo de promedio de 44 minutos (Suárez & Delgado, 2015, p. 114).

### 3.2 Identificación de subcentros por dependencia espacial

Garrocho y Campos (2007) hacen una revisión extensa y listan cinco métodos para la identificación de subcentros de empleo donde destaca las técnicas de econometría espacial, donde podrían emplearse las autocorrelaciones espaciales. Para llevar a cabo la investigación en Ciudad Juárez, es de interés utilizar las metodologías de movilidad y las técnicas de econometría espacial, específicamente autocorrelaciones espaciales globales y locales.

El análisis de datos estadísticos se llevó a cabo por medio de censos económicos que levanta el INEGI cada 5 años, los cuales cuentan con totales de empleo a nivel AGEB (Área Geoestadística Básica). Por otro lado, se obtuvieron los últimos tres censos económicos desglosados en empleos de manufactura, comercios y servicios de los años 2004, 2009 y 2014. El indicador de densidad empleo por AGEB se describe en la Ecuación 1:

$$E_i = \frac{\text{Total de empleo}}{\text{Hectáreas}} \quad (1)$$

### 3.2.1 Autocorrelación espacial I de Moran

La autocorrelación espacial además de evitar o disminuir los problemas antes descritos, es utilizado para realizar una comparación simultánea de un grupo de datos espaciales representados en polígonos y de los datos contenidos, ejecuta un análisis de patrones y concluye si existe un agrupamiento o no de entidades. El resultado representado con un índice entre -1 a 1 permite determinar el grado de autocorrelación espacial. En el grado en que el índice se inclina hacia el 1 positivo indica una similitud entre entidades colindantes, también conocido como valores calientes o alto-alto; en caso de estar los valores cercanos a cero, se entiende que los patrones mantienen un comportamiento aleatorio o atípico, nombrados bajo-alto o alto-bajo. Por último, entre más se acerque el índice a -1, se idealiza una dispersión o nula similitud entre las zonas vecinas, llamado bajo-bajo.

La Ecuación 2 de I de Moran global es la siguiente:

$$I = \frac{\left(\frac{n}{S_0}\right) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{\sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (2)$$

Donde  $S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$  conocida típicamente como la suma de los elementos de la matriz de pesos. Las observaciones  $z$  se refiere a las desviaciones de la media tanto para  $x_i$  como para  $x_j$ ,  $X$  es la variable de la localización de los vecinos. La matriz de pesos está representada por  $W_{ij}$ . En resumen, el I de Moran es la suma de las unidades locales (Celemín, 2009).

### 3.2.2 Autocorrelación espacial G de Getis-Ord

El método es muy semejante a I de Moran global, el cual realiza un análisis de cada unidad territorial con las entidades vecinas, pero con la diferencia en identificar agrupamientos altos y bajos. De esa forma, se realiza una sumatoria de los valores de la unidad de análisis con sus vecinos y se compara con la suma total de todas las identidades que participan en el estudio. Finalmente se identifican los valores más diferenciados que no estén dentro de un parámetro de azar, por lo que adquiere una significancia estadística que da claridad a la relevancia del resultado (Getis,

2007). Existe una tercera interpretación donde el índice no identifica unidades espaciales con vecinos semejantes y las etiqueta con valores bajo-alto o alto-bajo. En la Ecuación 3 se expone la versión global G, en ella se aprecia que la unidad central de análisis no se considera, restricción definida en  $i$  es diferente a  $j$ :

$$G = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} x_i x_j}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_i x_j} ; i \neq j \quad (3)$$

### 3.3 Encuesta origen-destino

La diferencia entre el levantamiento del INEGI (2017) con la que se plantea en este documento radica en la escala de la movilidad, es decir, en el proyecto de la Zona Metropolitana del Valle de México se analizan los viajes desde los municipios conurbados hacia la Ciudad de México y viceversa, mientras que en la propuesta para el estudio de Ciudad Juárez se levantó información a nivel intraurbano y observar la movilidad entre sectores internos de la ciudad llamados Unidades Territoriales de Análisis, determinados por una investigación que se detallará más adelante. En ese sentido, las unidades de observación contemplan únicamente las viviendas habitadas de la ciudad, dentro de cada vivienda es posible encontrar uno o varios hogares que comparten el mismo gasto familiar. Por último, dentro de cada hogar se analizan los integrantes, quienes hacen varios viajes a lo largo del día para realizar sus actividades cotidianas.

#### 3.3.1 Muestra localización y factores de expansión

El tamaño de la muestra se calcula a partir del Censo de la Población del 2010 del INEGI para Ciudad Juárez, donde se cuentan 361,470 viviendas habitadas particulares y colectivas, distribuidas de forma irregular dentro de los 637 AGEB. La cantidad de viviendas se considera como población finita, dato incorporado dentro de la fórmula estadística para calcular el tamaño de la muestra a levantar (Ecuación 4):

$$n = \frac{N \times Z_a^2 \times p \times q}{d^2 \times (N-1) + Z_a^2 \times p \times q} \quad (4)$$

Donde:

$n$  = Muestra

$N$  = Población finita

$Z_a^2$  = Nivel de confianza

$p$  = Probabilidad a favor

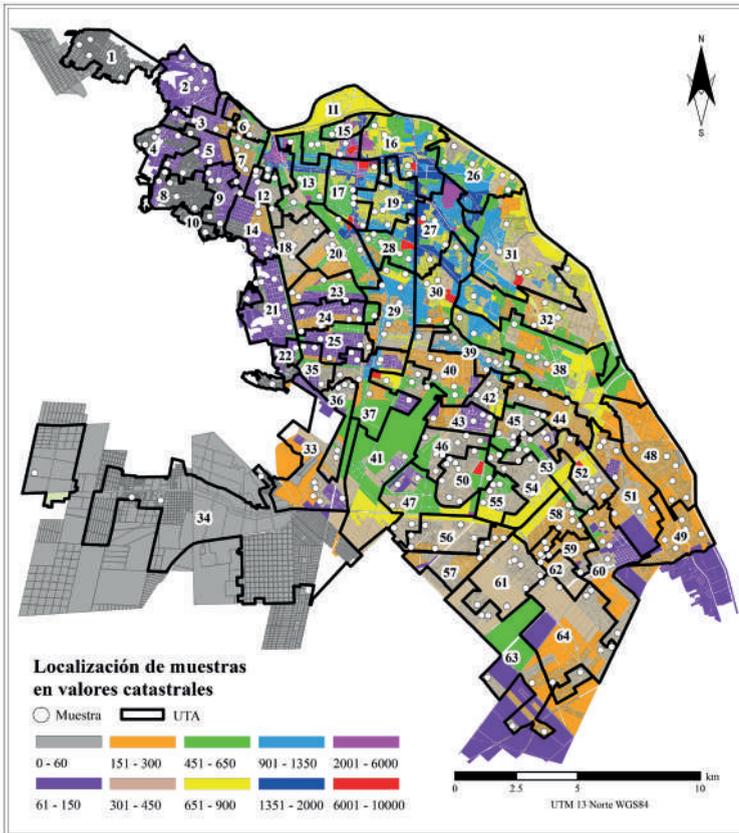
$q$  = Probabilidad en contra

$d^2$  = Margen de error

Se realizaron varios escenarios para determinar la cantidad de muestras y evaluar el recurso tanto económico como de tiempo para ejecutar el levantamiento en campo de datos, por lo que se optó por utilizar un nivel de confianza del 95% equivalente a un valor  $z$  de 1.96 y un margen de error de 5%. Debido a que no se tiene información previa de probabilidades a favor y en

contra, se toma el valor crítico para ambos, de 0.5 o 50% de aleatoriedad. De esta forma resulta un tamaño de muestra de 384 viviendas habitadas a visitar como mínimo, para cumplir con una cobertura geográfica en toda la ciudad.

La formación de las UTA surge en una investigación acerca de la medición multidimensional de la pobreza en Ciudad Juárez, donde se analizan las características de las viviendas y se refleja en una serie de agrupaciones por su similitud. Los estratos contienen características sociodemográficas determinadas a partir del ingreso (Fuentes *et al.*, 2018). El resultado es la división de la ciudad en 64 UTA (véase la Figura 3). Una vez definida la estratificación, se desglosan las 361,470 viviendas habitadas por cada AGEB (INEGI, 2010), posteriormente se suman los valores para obtener la cantidad de viviendas por UTA. Después se calculó el porcentaje que representa cada UTA respecto al total de viviendas habitadas y por último se distribuyen los 384 domicilios de la muestra con base al porcentaje de representatividad como se indica en la Figura 3.



**Figura 3.** Localización de zonas de muestreo a partir de valores de suelo por UTA. Fuente: elaboración propia.

Por último, en el análisis de los datos se requerirá extrapolar los resultados de las encuestas a cantidades aproximadas a la realidad, por lo que es necesario utilizar factores de expansión que multiplican a cada variable obtenida en el muestreo dentro de cada UTA. La expresión aplicada es la Ecuación 5:

$$FE = \frac{Vh}{m} \quad (5)$$

Donde:

FE = Factor de expansión

Vh = Viviendas habitadas dentro de la UTA

m = Muestra estadística dentro de la UTA

### 3.4 Algoritmo de Dijkstra

Los datos fueron capturados en ArcMap 10.6 para determinar líneas de deseo e isócronas de tiempo con la implementación de análisis de redes. ArcMap se basa en el algoritmo de Dijkstra para analizar las líneas de deseo e isócronas (ESRI, 2019). Los pasos secuenciales determinan la obtención de los caminos más cortos según los atributos y restricciones que definen el grafo (Dijkstra, 1959). El insumo principal para realizar el análisis fue la red vial de la ciudad, obtenida de la base de datos libre OpenStreetMap (Mikou *et al.*, 2019). Los parámetros se actualizaron mediante la consulta de Google Maps y Google Street, se le asignó la velocidad máxima, tiempo de recorrido, sentidos de desplazamiento, jerarquía y restricciones a los 74,237 vectores que compone la red vial de Ciudad Juárez. El modelo se calibró con los resultados de las encuestas y con ello se determinaron los tiempos y distancias reales de cada viaje modelado.

### 3.5 Líneas de deseo e isócronas de tiempo

Dentro del estudio de líneas de deseo se analiza la centralidad y la conectividad del origen con los destinos (Vecslir *et al.*, 2017), así mismo se incluyen la cantidad de viajes en porcentaje que surgen a partir del centroide de cada UTA con la impedancia de distancia (Seguí *et al.*, 2003). El análisis de isócronas asocia las particularidades de la red vial para determinar el tiempo en que tardaría una persona en desplazarse dentro de la mancha urbana y su área de alcance (López & Peña, 2017). Con la opción New OD Cost Matrix dentro de la herramienta Network Analyst, se configuraron las propiedades del viaje, donde se le asignó la impedancia distancia y que tome en cuenta la jerarquía y los sentidos de cada vialidad. Por otra parte, las isócronas fueron generadas con la opción New Service Area también dentro de la herramienta Network Analyst con la misma configuración que las líneas de deseo.

## 4. Resultados y discusión

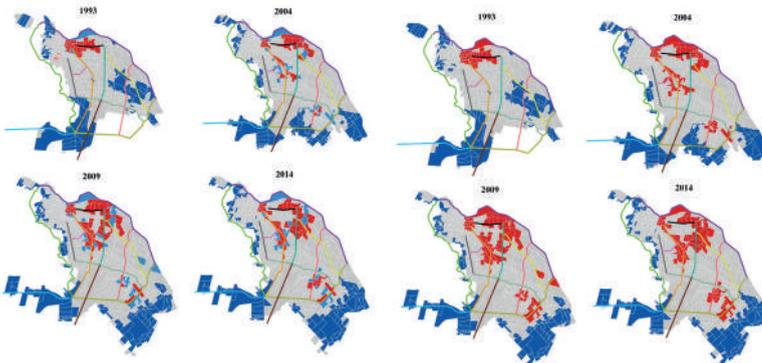
La aplicación de I de Moran global y G de Getis-Ord fue para cada censo económico, con la intención de conocer cada periodo de manera particular y posteriormente compararlos entre sí. Los resultados se muestran en la Tabla 1 para el análisis de empleos totales:

**Tabla 1.** Resultados de I de Moran global para densidad de empleo total

	1993	2004	2009	2014
I de Moran	0.569	0.176	0.189	0.266
Valor esperado	-0.001	-0.002	-0.002	-0.002
Valor z	26.335	2.921	2.405	2.876
p-valor	0.000	0.003	0.016	0.004
Patrón	Agrupado	Agrupado	Agrupado	Agrupado
G de Getis-Ord	0.048	0.023	0.023	0.037
Valor esperado	0.007	0.010	0.009	0.009
Valor z	4.025	9.195	11.132	6.125
p-valor	0.000	0.000	0.000	0.000
Patrón	Agrupado	Agrupado	Agrupado	Agrupado

**Fuente:** elaboración propia.

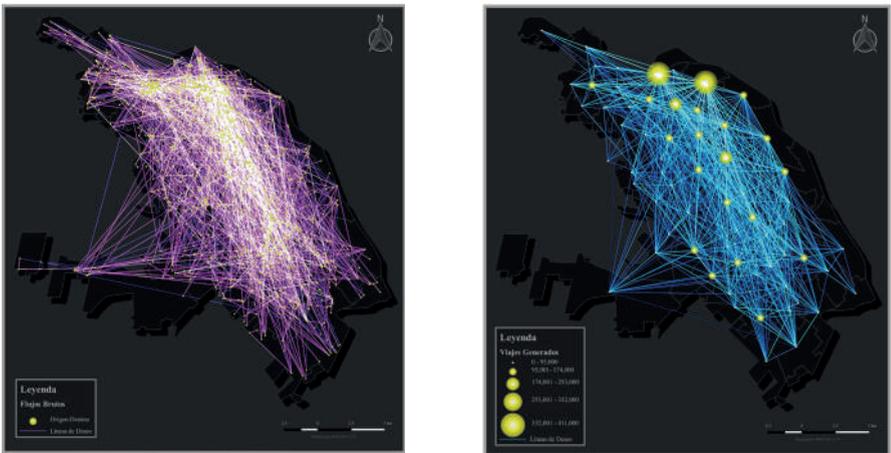
En el año 1993 se obtuvo un índice de 0.569, lo cual indica la existencia de una alta agrupación de empleos totales en la ciudad. En contraste, los años 2004, 2009 y 2014 resultan muy por debajo al de 1993: 0.172, 0.189 y 0.266 respectivamente. En comparación, los resultados del indicador G de Getis-presentan también un patrón agrupado para cada periodo con un p-valor menor a 0.05, incluso confirma que el año 1993 muestra una mejor autocorrelación global que los posteriores. En resumen, ambos métodos en su versión global, afirman que existen agrupaciones de empleo total, terciario y manufacturero. Lo sobresaliente es que los cuatro índices en ambas técnicas son considerados como agrupados, además tienen un p-valor menor 0.05, por lo tanto, existe suficiente evidencia estadística para afirmar que existen concentraciones de empleo en la ciudad dentro de todos los años estudiados. En la Figura 4 se exponen los resultados de la aplicación del análisis espacial por medio del indicador  $G_i$  de Getis-Ord:

**Figura 4.** Resultados I de Moran y  $G_i$  para densidad de empleo total.

Fuente: elaboración propia

### 4.1 Análisis de límites, costos y patrones de la movilidad cotidiana

Como primera aproximación, se modelaron los orígenes y destinos que se obtuvieron en las encuestas, unidos por una línea de deseo que representa el flujo de movilidad entre semana y en fin de semana. En la Figura 5 se muestran del lado izquierdo las localizaciones georreferenciadas con puntos de color amarillo y sus conexiones. En primera instancia, es relevante destacar que se obtuvieron datos en toda la mancha urbana, además, resalta la alta densidad tanto de puntos como de líneas en la parte central de la ciudad, formando una diagonal de norte a sur. Con el fin de simplificar los desplazamientos, en el mapa de la derecha se aglomeraron todos los orígenes y destinos de cada UTA, localizados en el centroide geográfico, representado por el tamaño de los puntos amarillos según la cantidad de viajes generados. Se aprecia que existen dos círculos al norte que distinguen las dos UTA con mayor importancia de atracción de movilidad (120,000 a 420,000 viajes).



**Figura 5.** Conectividad de viajes, georreferenciado y sintetizado.  
Fuente: elaboración propia.

La totalidad de registros por UTA se extrapolaron con la aplicación de factores de expansión con la fórmula 5, los resultados globales indican que se realizan 3,248,570 viajes en un día entre semana y 2,594,081 para un día del fin de semana, estas cifras consideran todos los motivos y modalidades de transporte. En este sentido, los valores de movilidad cotidiana entre semana se pueden comparar con lo mostrado en el PDUS del 2016, el cual indica que en Ciudad Juárez se realizan 3,900,000 viajes diarios, sin embargo, no se especifica mayores detalles de cómo se obtuvieron esos resultados. De manera general, 57.73% de los desplazamientos los realizan mujeres, mientras que los hombres 48.27%. Las encuestas dieron patrones acerca de los viajes entre semana que son realizados por motivos de movilidad obligatoria, como ir a trabajar y estudiar. Por el contrario, los viajes hechos en fin de semana se enfocan a

realizar actividades que no requieren horarios obligatorios como entre semana, tal es el caso de viajar para ir de compras o realizar actividades de recreación.

A manera de resumen, la Tabla 2 promedia los resultados de tiempo y distancia real por viaje, además del gasto semanal y el porcentaje del gasto destinado a la movilidad que representa del ingreso familiar, aplicado en cada modalidad. Los promedios dan un panorama diferente pero también válido para entender las dinámicas de movilidad en la ciudad. En términos de tiempo y distancia, cotidianamente caminar tiene un promedio de 12 minutos en distancias de 910 metros, mientras que el mayor tiempo invertido se realiza en camión escolar con 42 minutos en 13.78 km, incluso se utiliza el transporte de personal que en promedio utiliza 36 minutos en 10.31 km. Estos tres tipos de modalidades están íntimamente relacionadas a las actividades escolares y laborales, los cuales se ven afectados por las horas pico, periodo de tiempo donde la demanda de movilidad se incrementa y repercute en el aumento de tiempo en el trayecto, tal y como se discutió anteriormente.

**Tabla 2.** Inversión promedio por modalidad de transporte

Modalidad	Tiempo de un viaje (minutos)	Distancia de un viaje (km)	Gasto semanal en transporte	Porcentaje del ingreso	Ingreso semanal
Automóvil	22	7.40	\$342.59	12.82%	\$2 672.87
Bicicleta	23	4.92	Sin registro	Sin registro	Sin registro
Caminar	12	0.91	Sin registro	Sin registro	Sin registro
Camión escolar	42	13.78	Sin registro	Sin registro	Sin registro
Camión ruta	34	8.94	\$123.77	12.84%	\$964.04
Motocicleta	27	9.35	\$241.62	20.47%	\$1 180.57
Taxi	19	4.44	\$183.33	10.27%	\$1 785.71
Transporte de personal	36	10.31	Sin registro	Sin registro	Sin registro
Uber	19	6.61	\$206.81	11.93%	\$1 733.16
ViveBús-Ecobús	25	7.55	\$219.24	11.03%	\$1 987.91

**Fuente:** elaboración propia.

El gasto del transporte que repercute en el ingreso familiar es muy parecido en los medios motorizados, a excepción de la motocicleta. Al relacionar el gasto semanal con la afectación del ingreso se deduce que, en promedio, los que cuentan con automóvil tienen una mayor solvencia económica frente a los que utilizan los demás modos de transporte. En contraparte, las personas que utilizan el camión o ruta, motocicleta, bicicleta, transporte de personal y caminan tienen recursos económicos limitados que no les facilita poseer y mantener un automóvil. Por supuesto, estos argumentos son desde una visión general, seguramente existen casos que salen del escenario expuesto. Con este análisis se confirman los argumentos de Haig (1926), Isard (1956), Naess (2006) y Valdivia *et al.* (2009), que efectivamente, el simple hecho de viajar tiene un impacto en el presupuesto económico, tiempo y tipo de transporte del consumidor, y su grado de movilidad dependerá de su capacidad económica, de energía y herramientas disponibles. En este sentido, al combinar estas tres

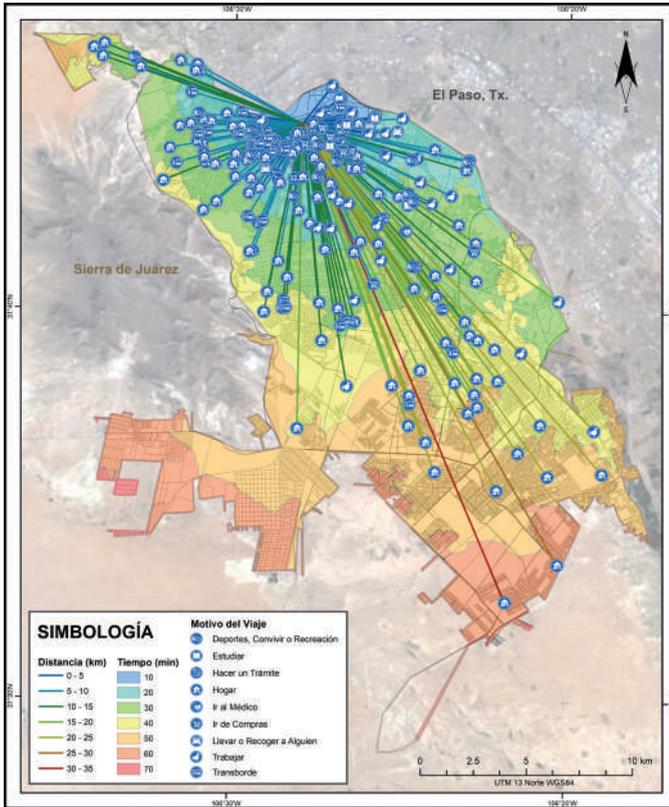
variables junto a la localización del hogar conforman la columna vertebral de la dinámica de la movilidad intraurbana, si bien en la teoría se habla de analizar fricciones de manera individual, con estos resultados se enfatiza que se deben combinar y analizar en conjunto para obtener una aproximación hacia la realidad de los desplazamientos.

## 5. Conclusiones

Definir una estructura urbana a partir de la movilidad cotidiana es posible desde dos escalas, la macro donde se analizan de forma global los resultados y se buscan patrones que describan las dinámicas de desplazamientos, así como los puntos más importantes de la ciudad, con la característica de tener una mayor atracción y/o generación de viajes. La segunda escala se enfoca a lo micro, en el estudio de las características de la zonificación propuesta, en este caso las unidades territoriales de análisis. Por lo tanto, las dinámicas de movilidad cotidiana se observan con mayor detalle y solo describe la zona en específico, que seguramente será diferente a las demás. Se invita al lector a consultar el Anexo A del documento original (Chaparro, 2020), referente al Atlas de Movilidad generado a partir del algoritmo de Dijkstra calibrado, donde se muestra para cada UTA un mapa de isócronas de tiempo y líneas de deseo, que representan las distancias recorridas cotidianamente por las personas para llegar a sus destinos, un ejemplo de ello se expone en la Figura 6.

El planteamiento de la hipótesis se discute desde dos perspectivas: la micro expone que la mayoría de las UTA tienen un comportamiento de movilidad más activo dentro de la misma, donde la mayoría de las personas buscan realizar las actividades esenciales lo más cercano posible a sus hogares. En datos numéricos, esto se comprueba por el tiempo que dedica cada persona en moverse y la distancia que está dispuesta a recorrer, según los modos de transporte disponibles. En la escala macro se observa la ventaja de la localización de la vivienda respecto a los centros de empleo de la autocorrelación espacial y de las áreas de mayor movilidad, por lo que las viviendas que se encuentran en el eje vertical de mayor movilidad tendrán ventaja en la cercanía de lugares donde pueden solventar sus necesidades. Por el contrario, las viviendas localizadas en la periferia tendrán que realizar viajes más largos. En términos económicos, las localizaciones dentro de áreas de mayor movilidad tendrán una renta mayor con un costo bajo en los desplazamientos, mientras que los más alejados, tendrán una renta menor que aumenta el costo del transporte.

Seleccionar y analizar la misma variable con índices de I de Moran y G de Getis-Ord, generó una discusión interesante en torno a la similitud de los resultados y sus diferencias metodológicas, pero con el argumento del complemento. Se concluye que utilizar más de una técnica de autocorrelación espacial mostrará un panorama más completo en agrupaciones de la variable analizada. Sin duda, se recomienda e invita a no restringirse en el uso de una sola técnica, así buscar relaciones entre ellas y construir un solo resultado explicativo.



**Figura 6.** Patrones de movilidad UTA 11 del atlas de movilidad.  
Fuente: elaboración propia.

Una vez planteadas las limitaciones y alcances de utilizar encuestas origen-destino, para definir una estructura urbana autores como Garrocho & Campos (2007), Fuentes & Hernández (2015), Siabato & Guzmán-Manrique (2019), Chaparro & Hernández (2020), entre otros, proponen el uso de la autocorrelación espacial, que efectivamente su adquisición de información es por mucho, más sencilla y barata que la aplicación de encuestas. Los hallazgos en esta investigación refutan a Ford (1996) referente a que el modelo monocéntrico impera en las ciudades latinoamericanas, indicativo que no es una estructura constante ni totalmente monocéntrica como lo sugerían Von Thünen (1826), Burgess (1925), Alonso (1964) y otros. Sin embargo se encuentran algunas similitudes con los modelos clásicos de Hoyt (1966) y Harris & Hullman (1945) en términos de sectores y dispersión. Recordar que estos modelos están más relacionados con las propuestas latinoamericanas modernas que exponen Mertins (2000) y Janoschka (2002), quienes muestran un DCN principal con una descentralización de la estructura urbana.

En términos de patrones de movilidad cotidiana, se descubrieron interesantes fenómenos, por ejemplo, el uso irracional del automóvil, que se evidencia por el tiempo y la distancia en viajes cortos; por otra parte, la segunda forma de movilidad es caminar, esto podría retomarse como discusión dentro de los temas de la ciudad caminable y el mejoramiento de la infraestructura peatonal; en el tercer lugar de importancia se encontró el servicio de transporte público, figurando como indispensable para las personas que no cuentan con suficientes ingresos para adquirir y mantener un vehículo propio, por lo tanto, los resultados que describen a este modo de transporte podrían ser utilizados para mejorar el sistema de transporte público actual.

Los costos, en términos económicos, de tiempo y distancias reales dan un panorama de la situación que atraviesan las personas según la ubicación de su vivienda y las actividades obligatorias que realizan cotidianamente. El tema asume mayor relevancia para la población que vive en la periferia, debido a que invierten mayor costo de tiempo y distancia, aunado a la calidad del servicio de transporte público, por tales motivos, los resultados aquí encontrados serían de utilidad en la creación o mejoramiento de políticas públicas destinadas al transporte público, infraestructura y planificación urbana, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de los usuarios.

En Ciudad Juárez no existe un programa que trate exclusivamente de movilidad, por lo que se propone crear o buscar ejemplos como el Programa Integral de Movilidad del D.F. 2013-2018, el cual tiene las bases para implementar política pública con fundamentos ecológicos, de accesibilidad, seguridad, inclusión, calidad y tecnología, tanto para movilidad particular como para mercancías. Lo anterior podría ajustarse a las necesidades locales, incluso ser mejorado para orientar e implementar acciones en el marco de la planeación, centrada en las múltiples formas en las que otros estudios de movilidad contribuyan y complementen el aquí mostrado, por ejemplo, en el área de movilidad de grupos vulnerables, turísticos, *commuting* internacional, normatividad, seguridad, entre otros.

Para cerrar, se busca que esta investigación aporte a los estudios urbanos y contribuya a investigaciones en otras áreas de conocimiento diferentes, por mencionar algunos ejemplos, se pueden relacionar los temas de salud, por su importancia actual ya que la movilidad es la forma de transmisión del COVID-19; proyectos de transporte urbano como la segunda ruta troncal del BRT; ecológicos por la contaminación causada de los vehículos motorizados; segregación residencial y sus dinámicas de movilidad; comercios informales y su influencia en los desplazamientos locales; planificación urbana; diagnóstico y mejoramiento de servicios de transporte público, entre otros, con el objetivo de mejorar la calidad de vida de la ciudadanía y puedan participar dentro del derecho a la movilidad como lo plantea (Borja, 2013), el cual es el medio para acceder a otros derechos fundamentales como al trabajo, la educación y esparcimiento.

## Bibliografía

- Aguilar, A. G., & Alvarado, C. (2004). La reestructuración del espacio urbano de la Ciudad de México: ¿Hacia la metrópoli multinodal?, en Adrián Guillermo Aguilar (coord.), *Procesos metropolitanos y grandes ciudades*. México: Instituto de Geografía, UNAM/Miguel Ángel Porrúa.
- Alegría, T. (1989). La ciudad y los procesos transfronterizos entre México y Estados Unidos. *Frontera Norte*, 1 (2), 7-37. <https://doi.org/10.17428/rfn.v1i2.1654>
- Alonso, W. (1964). *Location and Land Use*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Avelar-Sosa, L., García-Alcaraz, J., Cedillo-Campos, M., & Adarme-Jaimes, W. (agosto de 2014). Effects of regional infrastructure and offered services in the supply chains performance: Case Ciudad Juárez. *DYNA*, 81(186), 208-217. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n186.39958>
- Beckman, N., & Ingraham, P. (1965). The states and urban areas. *JSTOR*, 76-102. <https://doi.org/10.2307/1190686>
- Borja, J. (2013). *Revolución urbana y derechos ciudadanos*. Madrid: Alianza.
- Borsdorf, A. (2003). Cómo modelar el desarrollo y la dinámica de la ciudad latinoamericana. *Revista Eure*, XXIX (86), 37-49. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612003008600002>
- Burgess, E. (1925). The growth of the city: an introduction to a research project. *The Trend of Population*, 35-41. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5\\_5](https://doi.org/10.1007/978-0-387-73412-5_5)
- Capello, R. (2011). Location, Regional Growth and Local Development Theories. *AESTIMUM* 58, 1-25. <https://doi.org/10.1400/179189>
- Celemín, J. (2009). Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación. *Revista Universitaria de Geografía*, 18, 11-31.
- Cerda, J., & Marmolejo, C. (2010). De la accesibilidad a la funcionalidad del territorio: una nueva dimensión para entender la estructura urbano-residencial de las áreas metropolitanas de Santiago (Chile) y Barcelona (España). *Revista de Geografía Norte Grande* (46), 5-27. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022010000200001>
- Chang, S. E. (2004). Transportation geography: The influence of Walter Isard and regional science. *Journal of Geograph Systems* (6), 55-69. <https://doi.org/10.1007/s10109-003-0122-z>
- Chaparro (2020). *Impacto de la estructura urbana en la movilidad cotidiana de Ciudad Juárez, Chihuahua*. (Tesis). Ciudad Juárez, Chihuahua: Universidad Autónoma de Ciudad Juárez. Recuperado de <http://erecursos.uacj.mx/handle/20.500.11961/5733>
- Chaparro, I., & Hernández, V. (2020). La reconfiguración de los subcentros de empleo en Ciudad Juárez, Chihuahua, 2004-2014. *Región y sociedad*, 32, 1-48. <https://doi.org/10.22198/rys2020/32/1268>
- Christaller, W. (1966). *Central Places in Southern Germany*. (C. Baskin, Trad.) New Jersey: PRETINCE-HALL.
- Comisión Nacional de los Derechos Humanos. (2016). *Movilidad, vivienda y derechos humanos*. México.
- Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 269-271.
- ESRI. (2019). *Algoritmos utilizados por Extensión ArcGIS Network Analyst*. (ESRI, Ed.) Recuperado de ArcMap | ArcGIS Desktop:

- <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/extensions/network-analyst/algorithm>
- Ford, L. (1996). A New and Improved Model of Latin American City Structure. *Latin American Geography*, LXXXVI (3), 437-440. <https://doi.org/10.2307/215506>
- Fotheringham, S. (1981). Spatial Structure and Distance-Decay Parameters. *Annals of the Association of American Geographers*, LXXI (3), 425-436. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1981.tb01367.x>
- Fuentes, C. (2001). Los cambios en la estructura intraurbana de Ciudad Juárez, Chihuahua, de monocéntrica a multicéntrica. *Frontera Norte*, 13 (25).
- Fuentes, C., & Hernández, V. (2015). La evolución espacial de los subcentros de empleo en Ciudad Juárez, Chihuahua (1994-2004): un análisis con indicadores de autocorrelación espacial global y local. *Estudios demográficos y urbanos*, XXX (2), 433-467.
- Fuentes, C., Peña, S., & Hernández, V. (2018). La medición multidimensional de la pobreza a nivel intraurbano en Ciudad Juárez, Chihuahua (2012). *Estudios Fronterizos* (19), 1-25. <https://doi.org/10.21670/ref.1801001>
- Fujita, M. (2012). Thünen and the New Economic Geography. *Regional Science and Urban Economics* (42), 907-912. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2011.12.002>
- Gakenheimer, R. (1998). Los problemas de la movilidad en el mundo en desarrollo. *EURE (Santiago)*, XXIV (72), 33-52. <https://doi.org/10.4067/S0250-71611998007200002>
- Garrocho, C., & Campos, J. (2007). Dinámica de la estructura policéntrica del empleo terciario en el área metropolitana de Toluca, 1994-2004. *Papeles de Población* (52), 110-135.
- Getis, A. (2007). Reflections on Spatial Autocorrelation. *Regional Science and Urban Economics*, 37(4), 491-496. <https://doi.org/10.1016/j.regsciurbeco.2007.04.005>
- Graizbord, B. (2008). *Geografía del transporte en el área metropolitana de la Ciudad de México* (Primera ed.). México, D.F.: El Colegio de México.
- Haig, R. (1926). Towards an Understanding of the Metropolis: II The Assignment of Activities to Areas in Urban Regions. *Quarterly Journal of Economics*, 402-434. <https://doi.org/10.2307/1885172>
- Harris, C., & Ullman, E. (1945). The Nature of Cities. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 242, 7-17.
- Harvey, D. (1989). *The urban experience*. Oxford: Basil Blackwell.
- Hernández, V. (2012). Análisis exploratorio espacial de los accidentes de tránsito en Ciudad Juárez, México. *Rev Panam Salud Publica*, 31(5), 396-402.
- Hernández, V., & Fuentes, C. (2014). Estudio de los accidentes de tránsito usando modelos de regresión locales para la planificación de la seguridad en el transporte. *Ciencias Administrativas y Sociales, Handbook T-IV: Congreso Interdisciplinario de Cuerpos Académicos*. ECORFAN, 293-305.
- Hernández-Hernández, V., & De Haro-De León, L. (2014). La relación entre la centralidad urbana y los atropellamientos en Ciudad Juárez, México. *Revista Hacia la Promoción de la Salud*, XIX (2), 81-94.
- Hidalgo, D. (Mayo de 2005). Comparación de alternativas de transporte público masivo - Una aproximación conceptual. Dossier *Revista de Ingeniería*, 94-103. <https://doi.org/10.16924/revinge.21.10>
- Hotelling, H. (1929). Stability in Competition. *The Economic Journal*, XXXIX (153), 41-57. <https://doi.org/10.2307/1911955>

- Hoyt, H. (1939). *The Structure and Growth of Residential Neighborhoods in American Cities*. Washington, D.C.: Federal Housing Administration.
- Hoyt, H. (1966). *According to Hoyt: fifty years of Homer Hoyt*. Washington, DC.: Homer Hoyt.
- INRIX. (2020). INRIX 2018 Global Traffic Scorecard. <https://inrix.com/scorecard/>
- Instituto Municipal de Investigación y Planeación. (2010). *Plan de Desarrollo Urbano*. PDU. Ciudad Juárez, Chihuahua, México: Ayuntamiento de Juárez.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). INEGI. <http://www.inegi.org.mx>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2010). XIII Censo de Población y Vivienda. México
- Isard, W. (1949). The General Theory of Location and Space-Economy. *The Quarterly Journal of Economics*, LXIII (4), 476-506. <https://doi.org/10.2307/1882135>
- Isard, W. (1956). *Location and Space-Economy: A General Theory Relating to industrial location, Market Areas, Land Use, Trade and Urban Structure*. New York: The Technology Press of Massachusetts Institute of Technology and John Wiley & Sons, Inc.
- Janoschka, M. (2002). El nuevo modelo de la ciudad latinoamericana: fragmentación y privatización. *Revista Eure*, XXVIII (85), 11-29. <https://doi.org/10.4067/S0250-71612002008500002>
- López, J. A., & Peña, S. (2017). La segregación socioespacial en Ciudad Juárez, Chihuahua, 1990-2010. *Región y sociedad* (68), 115-152. <https://doi.org/10.22198/rys.2017.68.a210>
- Lowry, I. (1964). *A model of metropolises*. Santa Monica, California: The Rand Corporation.
- Mertins, G. (2000). Ciudades medianas en América Latina: criterios, indicadores y el intento de un modelo de su diferenciación socio-espacial y funcional. *Espacio y Desarrollo* (12), 11-23.
- Meyer, K., & Bähr, J. (2004). La difusión de condominios en las metrópolis latinoamericanas. *Revista de Geografía Norte Grande* (32), 39-53.
- Mikou, M., Rozenberg, J., Koks, E., Fox, C., & Peralta, T. (2019). *Assessing Rural Accessibility and Rural Roads Investment Needs Using Open Source Data*. Policy Research Working Paper.
- Miralles-Guasch, C. (2002). *Ciudad y transporte*. El binomio imperfecto. Barcelona: Ariel Geografía.
- Miralles-Guasch, C., & Cebollada, Á. (2009). Movilidad Cotidiana y Sostenibilidad, una Interpretación desde la Geografía Humana. *Boletín de la A.G.E.* (50), 193-216.
- Morales-Soto, N., Alfaro-Basso, D., & Gálvez-Rivero, W. (2010). Aspectos psicosociales y accidentes en el transporte terrestre. *Rev Peru Med Exp Salud Pública*, XXII(2), 267-272.
- Naess, P. (2006). *Urban Structure Matters: Residential location, car dependence and travel behavior*. New York: Routledge.
- Ortega, V. (2016). El sistema Bus Rapid Transit en Ciudad Juárez y el derecho a la ciudad. *Chihuahua Hoy*, 455-478.
- Ortiz, K. (2018). *La movilidad urbana como un derecho a la ciudad*. Caso BRT en Ciudad Juárez Chihuahua, 2010-2016 (tesis). Ciudad Juárez, Chihuahua: El Colegio de la Frontera Norte.
- Parr, J. (2015). Exploring the urban system of von Thünen's isolated state. *Regional Science*, XCIV (1), 161-176. <https://doi.org/10.1111/pirs.12057>
- Plan Estratégico de Juárez, A.C. (2018). Informe *Así Estamos Juárez 2018*. Ciudad Juárez, México. Recuperado de <https://asiestamosjuarez.org/informes/informe-asi-estamos-juarez-2018/>

- Ricardo, D. (1821). *On the Principles of Political Economy and Taxation*. Londres: Everyman Library.
- Rivas, L., Chávez, J., & Maldonado, B. (diciembre de 2007). Incentivos y desincentivos en los sistemas de transporte público en Londres, Madrid y Ciudad de México. *Rev. Innovar*, 17 (30), 113-132.
- Rodríguez, M. (2000). *Modelos socio-demográficos. Atlas social de la ciudad de Alicante*. Alicante: Universidad de Alicante.
- Seguí, J., Ruiz, M., Guaita, F., Escalas, F., & Bauzá, A. (2003). La Planeación de Rutas de Transporte Escolar a Través de un SIG: El Proyecto SIGTEBAL. *GeoFocus* (3), 58-76. <https://geofocus.org/index.php/geofocus/article/view/23>
- Siabato, W., & Guzmán-Manrique, J. (2019). La autocorrelación espacial y el desarrollo de la geografía cuantitativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28(1), 1-22. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v28n1.76919>
- Sobrino, L. J. (2006). Macroestructuración especial del sector servicios en la Ciudad de México", en Gustavo Garza (coord.), *La organización espacial del sector servicios en México*. México: El Colegio de México.
- Suárez, M., & Delgado, G. (2015). Entre mi casa y mi destino. Movilidad y transporte en México. Encuesta Nacional de Movilidad y Transporte. México: UNAM.
- Suárez, M., & Delgado, J. (2007). Estructura y eficiencia urbana: accesibilidad a empleos, localización residencial e ingreso en la zona metropolitana de la Ciudad de México (1990-2000). *Economía, Sociedad y Territorio*, VII(23), 693-724.
- Tolley, R., & Turton, B. (2013). *Transport Systems, Policy and Planning: A Geographical Approach*. New York: Routledge.
- Vecslir et al., L. (2017). Reestructuración de la centralidad y movilidad cotidiana en el sur de la Región Metropolitana de Buenos Aires. *Revista Transporte y Territorio* (17), 267-287. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333053372013>
- Von Thünen, J. (1826). *Isolated State* C. Wartenberg (Trans). New York, NY: Pergamon Press.
- Warner, H., & Aberg, L. (2006). Drivers' decision to speed: A study inspired by the theory of planned behavior. *Transportation Research Part F* 9, 427-433. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2006.03.004>
- Weber, A. (1909). *Theory of The Location of Industries* (Reimpreso en 1971 ed.). (C. Friederich, Trad.) Chicago Illinois: The University of Chicago Press.
- White, H. (1977). The Geographical Approach to Transport Studies. *Discussion Pappers in Geography* (1).
- Wingo, L. (1961). *Transportation and urban land*. Baltimore, MD: John Hopkins University Press.
- Zelinsky, W. (1971). The Hypothesis of the Mobility Transition. *Geographical Review*, 61(2), 219-249. <https://doi.org/10.2307/213996>



# Analyzing Segregation of Informal Residents in Latin American Cities' Periphery Using Remote Sensing

Analizando la segregación de los asentamientos informales en la periferia de las ciudades latinoamericanas usando imágenes satelitales

Sonia Morales<sup>1</sup>

*Recibido 19 de septiembre de 2022; aceptado 21 de octubre de 2022*

## ABSTRACT

The urban pattern has changed significantly in Latin American cities over the last decades. Since the 1980s, urban policies have increased the periphery land value, promoting suburbanization that restricted spaces for informal settlers. The study used Landsat imagery to analyze if urban pattern changes in Bogota, Colombia and Sao Paulo, Brazil forced informal settlements to move closer to environmental risk areas or areas with limited mobility. This research used a stratified supervised classification to locate formal and informal developments in 2000 and 2018, followed by multiple criteria evaluation to categorize environmental risk and mobility in the study area. The results revealed that segregation in the periphery of cities is not a generalized pattern in the city periphery but a localized phenomenon encouraged by urban policies.

*Key words: remote sensing, segregation, informal settlements, city's periphery.*

## RESUMEN

En Latinoamérica, los patrones de crecimiento urbano han cambiado significativamente en la última década. Desde los años ochenta, las políticas urbanas han hecho que el valor del suelo la periferia de las ciudades crezca restringiendo el espacio disponible para asentamientos informales. Esta

<sup>1</sup> Department of Geography & Environmental Studies at Northeastern Illinois, University in Chicago, Illinois, USA, e-mail: [smmoralesd@gmail.com](mailto:smmoralesd@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1215-4018>.

investigación usó imágenes satelitales Landsat para analizar los cambios urbanos en Bogotá, Colombia y Sao Paulo, Brasil que forzaron a habitantes informales de la ciudad a desplazarse cerca a zonas de riesgo o áreas con movilidad limitada. El estudio utilizó una clasificación supervisada y estratificada para localizar desarrollos formales e informales seguido por una evaluación de criterio múltiple para categorizar riesgo ambiental y movilidad en el área de estudio. El estudio encontró que la segregación en la periferia de las ciudades no es generalizada, es un fenómeno localizado incentivado por las políticas urbanas.

Palabras clave: *imágenes satelitales, segregación, asentamientos informales, periferia urbana.*

## 1. Introduction

Historically, poor and informal residents settled closer to the urban periphery, in a hierarchical structure in Latin American cities. Land cost is a main factor. The lack of infrastructure and poor public services in the city fringe make the land cheaper, and poor residents take those locations due to the low cost. However, the "best location" in Latin American cities has changed significantly in the last decades. Neoliberal policies, implemented in the '80s, have increased the city's periphery land value, promoting a formal suburban development. New developments for high and middle-class residents still occupied the best locations but are now on the periphery of cities. The social structure is forcing poor residents to relocate to disadvantaged sites.

The research evaluates how high- and middle-class residential areas affected poor residents in the periphery of Bogota, Colombia, and Sao Paulo, Brazil due to urban policies adopted since 2000. The project uses Landsat images and GIS data to locate informal settlements and identify hazardous places. The aim is to visualize the segregation patterns of informal residents from the year 2000 to the year 2018.

### 1.1 Urban Patterns in Latin American Cities Changed by Urban Regulations

In the twenty-first century, neoliberal urban policies, adopted in Latin American cities, introduced zoning boundaries and limited lot by lot city sprawl outside the administrative border. However, those zoning regulations did not limit the population settled illegally in cities. In 2017, the UN Economic Commission for America Latina (CEPAL) informed that at least 30% of the population of Latin American largest cities live in informal settlements (CEPAL, 2018).

In general, the condition of informal settlements has been upgrading over time in Latin American cities (Rocco *et al.*, 2019). Nevertheless, some characteristics are the same in informal settlements over time, such as a disorganized plot, inadequate transportation infrastructure, and deficiencies in sewage and electricity due to an unplanned development (Hardoy & Pandiella, 2009). The vulnerability of poor populations living in informal settlements has

become the central social issue for national governments in Latin America in the last two decades (Allen *et al.*, 2017).

At the national level, Latin American countries created policies, national entities, and planning strategies to manage environmental risk to solve this problem in the late 1990s. At the local level, measures focused on preventing disaster and reducing populations' vulnerability by relocating people to new public housing projects. For example, people living in informal settlements established in high-risk zones were relocated to housing projects, which reduced in numbers the amount of poor people's vulnerability but did not fulfill the social needs of those populations (Hardoy & Pandiella, 2009).

The new market was attractive to private companies who started to suburbanize the city's fringe at the beginning of the century. The purpose of public housing changed and attracted the middle-class, high-class population. The new urban pattern affected illegal residents of the urban fringe. Real estate developers built gated condominiums in former shanty areas (Lopez-Morales *et al.*, 2016). The unequal growth of cities' fringe has an origin in the neoliberal land-use policies incorporated at the beginning of the century. From that moment, the urban fringe developed into an urban structure sprawled but fragmented, and highly segregated, creating a spatial class configuration that affects principally poor residents (Aguilar *et al.*, 2003; Castro-Correa *et al.*, 2015; Gilbert, 1998; Inostroza *et al.*, 2010; Inostroza & Tabbita, 2016).

The new regulations created physical barriers to settling in cities. At the same time, they allowed private big housing projects to surpass urban city limits to accommodate the periphery's social housing demand and reduce urbanization public costs. For instance, Partial Plans in Colombia and the ZEIS program in Brazil exchanged the cost of urbanization for a high-profit margin of new housing in the periphery with private investors. Several researches proved that those private new projects did not improve the living conditions of the marginalized populations (Codina, 2005; Klaufus, 2013). The cost to supply public services in the expansion area was not assumed by the State but by private investors that only supplied their developments. Only the more profitable parts of partial plans were built, and the plan's public services provision was sometimes not executed (Montaña & Borrero, 2015). Consequently, the public transportation system, operated by private companies, did not see profit in routes without proper streets and public adequations.

The public service shortage and minimum transportation access affected principally illegal settlers in the city fringe. One of the reasons is that unplanned houses, informally developed, did not have paved roads or adequate transportation infrastructures, such as sidewalks, bus stops, or feeder routes in illegal neighborhoods (Jaitman, 2015; Yañez-Pagans *et al.*, 2019). Cities invest in public infrastructure mainly in the principal streets or highways (Angotti, 2013), and transportation networks in the periphery of cities are incorporated after urban development is consolidated.

The mobility issues of poor residents in Bogota, Colombia, and Sao Paulo, Brazil, have been studied before. Bogota has an internationally recognized

Bus Rapid Transit (BRT) system, 'Transmilenio,' that improved commute, quality, and security. However, several studies have found that the system is highly exclusionary. Bassett and Marpillero-Colomina (2013) argued that 'Transmilenio' is a gentrifying agent that displaces poor residents from its main stations. Moreno & Miralles-Guasch (2017) indicated that the periphery's service is precarious, 'feeder buses' are limited in some areas. Guzman *et al.* (2017) found that the system is highly unequal. The rationale for locating bus stops and stations depends on the amenities nearby and not serving people who actually need the service.

In Sao Paulo, Brazil, the transportation infrastructure has similar problems. Favelas in Brazil have limited access to public transportation systems due to the overcrowded conditions of neighborhoods. Sao Paulo BRT lines go mainly from the periphery to the city center, not tangentially connecting neighborhoods (Tomasiello *et al.*, 2019). Studies revealed that the BRT system is inefficient, buses are overcrowded, and routes have unreliable schedules (Amparo Alves, 2014; Hyman, 2018). Weak mobility is one of the main problems of people living in informal settlements on the periphery of Latin American cities.

The environmental conditions such as steep slopes, wetlands and rivers within the city, and rainy seasons limit land for settlement in Latin America. Several researchers have studied the vulnerability of informal settlements in high environmental risk areas. Wenzel *et al.* (2007) observed that informal settlements are exposed to environmental hazards due to the low quality of construction and the high density of settlements. Hardoy & Pandiella (2009) found that people living on the fringe of Latin American cities are exposed to more environmental hazards than people living in the center of cities due to their low access to disaster assistance. In the same context, Allen *et al.* (2017) discovered that informal settlements experience higher ecological risk because the poor inhabitants are marginalized in "risk traps" with consecutive small-scale disasters, highly localized and with difficult access. For instance, Informal settlements in Bogota are typically located in the "Cerros," steep slopes situated in the south and east (Maceratini, 2011); Even though the sector consolidated years ago, the access is through small unpaved roads inaccessible to cars, people have to walk an average of 30 minutes to bus stops (Moreno and Miralles-Guasch, 2017). The complex topography and unplanned origin of informal settlements restrict their urban structure and limit the growth connected to the city.

Favelas in Sao Paulo have a similar problem with the transportation network. However, the primary concern of informal settlements in Sao Paulo is that they are located in flooding zones. The environmentally risky location created several problems. On the one hand, public regulations prohibit sewerage installation in flooding locations (Budds & Teixeira, 2005). On the other hand, informal settlements are located on land reserved for forests that cannot be regularized (Silva & Ceneviva, 1996). Additionally, the sprawl of the Sao Paulo Metropolitan Area involves 39 municipalities making it challenging to consolidate a unified policy for informal developments. Finally, the political division of each city

creates barriers to locating and preventing environmental risk outside their political boundary.

In summary, neoliberal policies implemented in many Latin American cities increased spatial segregation in different ways. First, the economic structure of cities increased class inequalities geographically, with a system that mainly benefited the wealthier population. Second, the deregulation of the land market facilitated peripheral suburbanization and created a social problem for poor inhabitants. Finally, service infrastructure in the periphery of cities was constructed unequally, serving principally high and middle socio-economic classes. Therefore, urban policies implemented in cities since the 2000s have focused on economic interest over social justice. The change in the public policy creates a time frame to research the segregation of informal settlements in Latin American cities.

## 1.2 Remote Sensing Images to Analyze Urban Patterns

In Latin America, urban sprawl of cities has been studied mainly through census information (Aguilar *et al.*, 2003; Inostroza *et al.*, 2010; Inostroza, 2016; Inostroza & Tábbita, 2016; Rojas *et al.*, 2013), which focused on the change of population density within the administrative boundary. However, it creates a normative gap in locating informal settlements outside the urban boundary.

The use of satellite images to map slums is widely used. Kohli *et al.* (2012) used very high resolution (VHR) images to create a rapid inventory of the location and physical composition of slums. They were able to explain patterns over time and space using remote sensor data; however, they found that visual interpretation methods required local expertise to produce reliable results. Mahabir *et al.* (2018) indicated that VHR images can capture information in real-time compared with traditional survey methods which are labor-intensive, time-consuming, and may require significant financial support depending on the study area size.

In Latin America, the use of VHR images for mapping informal settlements is scarce. It needs several images to provide city-wide coverage, which increases the cost of the study. The VHR images have a temporal limitation; satellites such as Worldview-1 that cover the area were launched in 2007 which means that VHR images before that date are not available to conduct a temporal analysis of informal settlements' urban growth.

Based on the literature review, remote sensor data are appropriate to measure informal settlements in a city scale. This research explores an inexpensive way to map informal settlements in Latin American cities using moderate resolution images from LANDSAT enhanced with pan-sharpening. The methodology is particularly relevant to raise the interest of studying poverty and informal housing in Latin America beyond public institutions. In addition, the research explores the connection between new developments and informal settlements and how urban regulations may increase Latin American cities' inequality. Identifying this problem will help public institutions

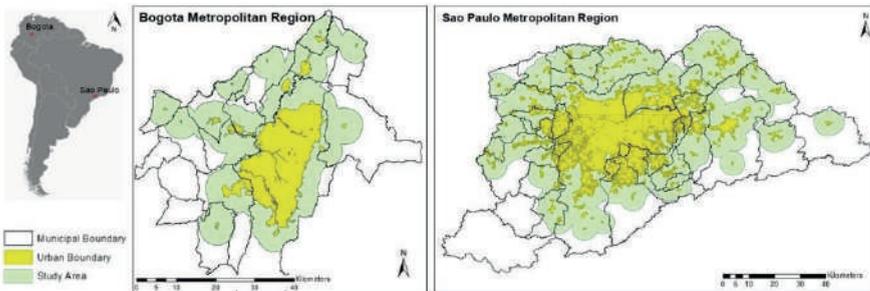
to reframe urban public policies towards better solutions for informality other than displacement.

This study aims to contribute to a better understanding of the spatial segregation patterns in Latin American cities. The research evaluates the growing high and middle-class residential areas in the periphery affecting informal settlements due to urban policies adopted after 2000. Furthermore, the study identified how mobility and exposure to environmental hazards affected informal settlements over time.

## 2. Methodology

### 2.1 Area of study

The research analyzed the change of urban patterns in two Latin American cities; Bogota, Colombia, from 2002 to 2018, and Sao Paulo, Brazil, from 2000 to 2017 (Figure 1). Both municipalities have similarities in topography, economic relevance in their country, and comparable urban growth patterns. Also, they have a concentric and compact city center and a dispersed pattern in the periphery. Additionally, they incorporated the Bus Rapid Transit (BRT) system and introduced neoliberal Strategic Master Plans at the beginning of the 21st century. Finally, both cities' periphery has hazardous environmental conditions such as steep slopes and areas exposed to floods.



**Figure 1.** Study area in Bogota Metropolitan Region and the Sao Paulo Metropolitan Region.

The study aims to identify changes in the area beyond the denominated urban expansion area. The main reason for selecting the margin outside the urban area is that cities prohibit urban construction outside the border, making informal settlements more likely to exist. Therefore, the study applied a four-kilometer buffer from the urban administrative boundary to identify the expansion area used for this study. Additionally, the research excluded towns smaller than 300,000 square meters that are not representative of the study scale.

## 2.2 Methods

The procedure of this study is illustrated by the flowchart shown in Figure 2. The methodology included three sections: an image classification of formal and informal settlements in the study area, rank environmental risk by population, and rank mobility by population. The first section identified the change in urban patterns for formal and informal developments during the study period. The second section identified if the risk level for each settlement has increased or decreased over time. Finally, the third section identified whether each settlement's mobility has changed overtime.

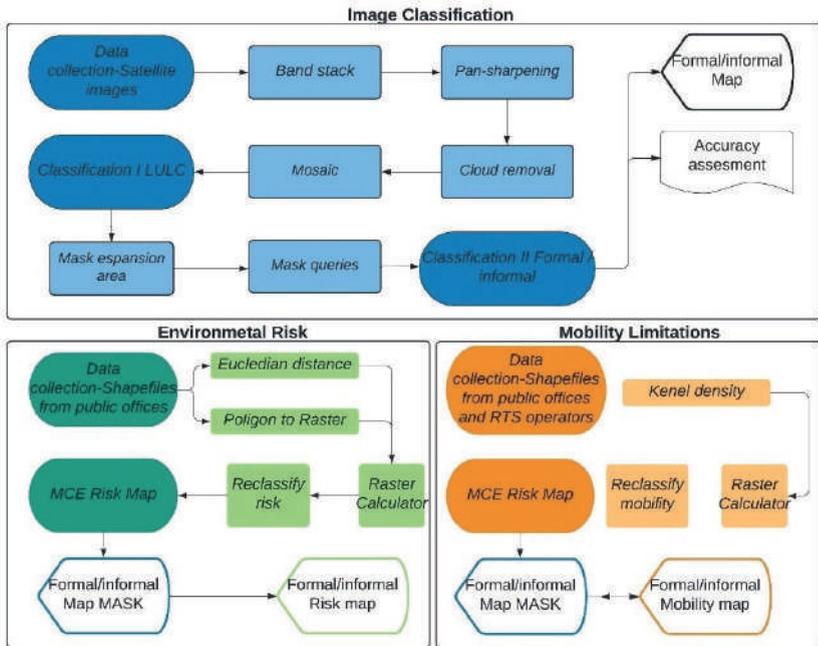


Figure 2. Methodology Flow Chart.

The study's general timeline is from 2000 to 2018, covering the beginning of the implementation of neoliberal urban policies in Latin America. Although cloud cover is an issue in the Andes region, the study used data from adjacent years to get cloud-free mosaics for both cities. Tropical cities are not affected by seasonal changes. For that reason, the study acquired data across seasons to help increase data availability. The image characteristics are described in Table 1.

The image processing was based on a stratified classification process. Initially, a supervised classification using the maximum likelihood algorithm was applied to identify eight land cover types. Once the urban area's land cover classes were extracted, the study applied a second classification to the urban areas to further classify formal and informal settlements. The characteristics of formal development were lots with regular size, square shape, similar roof materials,

urban grid pattern, paved streets with sidewalks, light posts, traffic signs, and electric provision. Informal development training sites were characterized by a small street size, no paved, or non-existent sidewalk organic urban structure, irregular plot size, shapes and highs, and roof materials.

**Table 1.** Characteristics of Landsat data used in this study

<i>Location</i>	<i>Sensor</i>	<i>Path/row</i>	<i>Resolution</i>	<i>Projection</i>	<i>Date</i>
Bogota, Colombia	Landsat 8 OLI_TIRS	008/57	Multispectral: 30m Panchromatic:15m	UTM 18N	2018/12/30
	Landsat 7 ETM+	008/57	Multispectral: 30m Panchromatic:15m	UTM 18N	2001/01/21 2002/02/25 2002/09/21
	Landsat 8 OLI_TIRS	219/76 219/77	Multispectral: 30m Panchromatic:15m	UTM 23S	2017/07/26 2017/07/26
Sao Paulo, Brazil	Landsat 7 ETM+	219/76 219/77	Multispectral: 30m Panchromatic:15m	UTM 23S	2000/04/30 2001/08/30

Once formal and informal areas were classified, the study used a raster-based multiple criteria evaluation (MCE) to identify environmental risk areas. Then, they used Euclidean distance to normalize the data. After that, the researchers calculated the number of pixels according to their risk value using landscape metrics to evaluate risk in informal and formal developments. The study used a similar methodology applied Kernel density instead of Euclidean distance, then landscape metrics to evaluate the mobility of informal and formal developments in the study area.

### 2.3 Accuracy Assessment

The study used an error matrix to assess the accuracy of image classification, using reference data collected from Google Earth's high-resolution images (Table 2). The accuracy assessment was based on stratified random samples. According to each city's location, patch size, and total area, the number of samples increased.

The overall accuracy of all maps varies from 82.9% to 86.7% (Table 2). Although the accuracy assessment showed that informal settlements classification had slightly lower accuracy than formal developments, it is considered adequate for the purpose of this study for comparing the general patterns of informal settlements.

### 2.4 Environmental risk of informal settlements

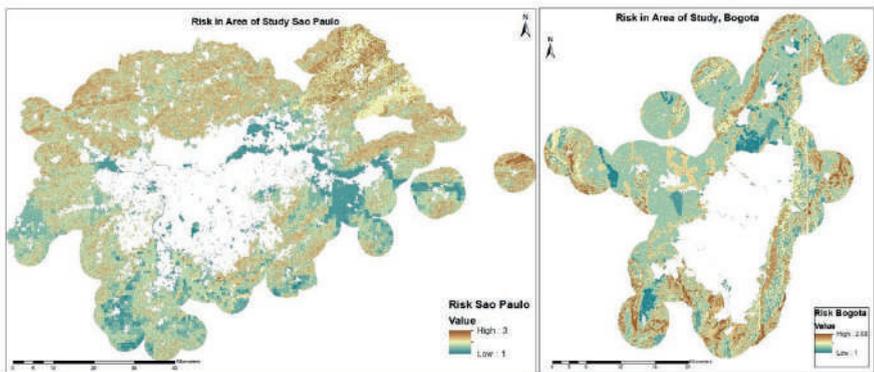
The study used a raster-based multiple criteria evaluation (MCE) approach to calculate environmental risks that affect Bogota and Sao Paulo metropolitan regions (Figure 3). This methodology weighted variables such as proximity to rivers, proximity to wetlands, proximity to forest, and slope to identify an overall risk level.

**Table 2.** Error matrix of accuracy assessment

DATA	Bogota, 2002				Bogota, 2018			
	Reference data				Reference data			
	Formal	Informal	Total	User's accuracy	Formal	Informal	Total	User's accuracy
Formal	33	2	35	94.30%	195	20	215	90.70%
Informal	10	25	35	71.40%	29	91	120	75.80%
Total DATA	43	27	70	82.90%	224	111	335	83.30%
Producer's accuracy	76.70%	92.60%			87.10%	82.00%		

DATA	Sao Paulo, 2000				Sao Paulo, 2017			
	Reference data				Reference data			
	Formal	Informal	Total	User's accuracy	Formal	Informal	Total	User's accuracy
Formal	307	3	310	99.00%	475	25	500	95.00%
Informal	18	52	70	74.30%	134	326	460	70.90%
Total DATA	325	55	380	86.70%	609	351	960	82.90%
Producer's accuracy	94.50%	94.50%			78.00%	92.90%		

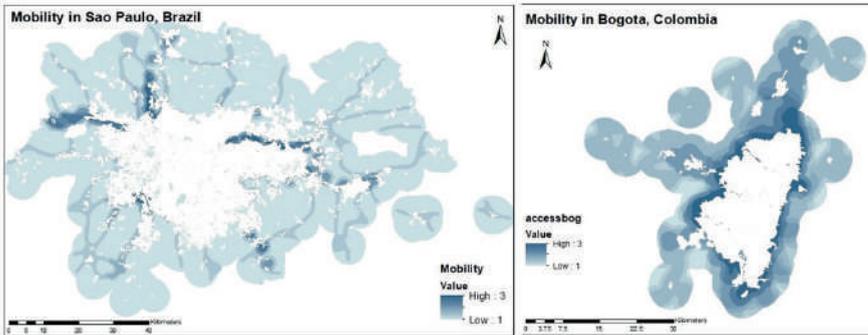


**Figure 3.** Environmentally risk areas in Bogota and Sao Paulo.

The aim was to produce an assessment risk map for the expansion area to measure the settlements' hazardous environmental conditions. The study used Euclidean distance to calculate each criterion to determine risk on a relative scale from 1 to 3, in which 1 represents areas with low risk, 2 represents areas with moderate risk, and 3 illustrates areas with high risk.

## 2.5 Mobility of informal settlements

To measure mobility, this study used data from public transportation systems in each city, including bus routes and stops and main roads connecting metropolitan areas. Both cities have BRT systems, called 'Transmilenio' in Bogota and 'Expresso Tiradentes' in Sao Paulo. The study measured kernel density of bus stops, streets with bus routes, and regional highways to estimate the mobility of informal settlements located in the cities' periphery (Figure 4).



**Figure 4.** Mobility in Bogota and Sao Paulo.

Koch (2013) indicated that people in the suburban favelas in Sao Paulo had to walk over 30 minutes (approximately 2000 m) to bus stops. This study therefore used 2000 m as the average pedestrian distance from home to any transportation system. The methodology applied Kernel density to measure mobility to a scale of 1-3, in which 1 represented the least mobile areas and 3 represent the most mobile areas

## 3. Results

The result focuses on three aspects. First, the study estimated where informal residents are displaced by comparing formal and informal urban settlements over the years. Second, the study evaluated the average environmental risk to identify which population settle in areas with higher environmental risk. Third the research identified where the urban growth (formal and informal) was closer to areas with better mobility.

### 3.1 Formal and informal Urban Development

The results showed that Bogota had a fragmented urban growth from 2002 to 2018 (Figure 5).

Similar to what Inestroza *et al.* (2010) and Lopez -Morales *et al.* (2016) found out, informal development was more fragmented than formal development,

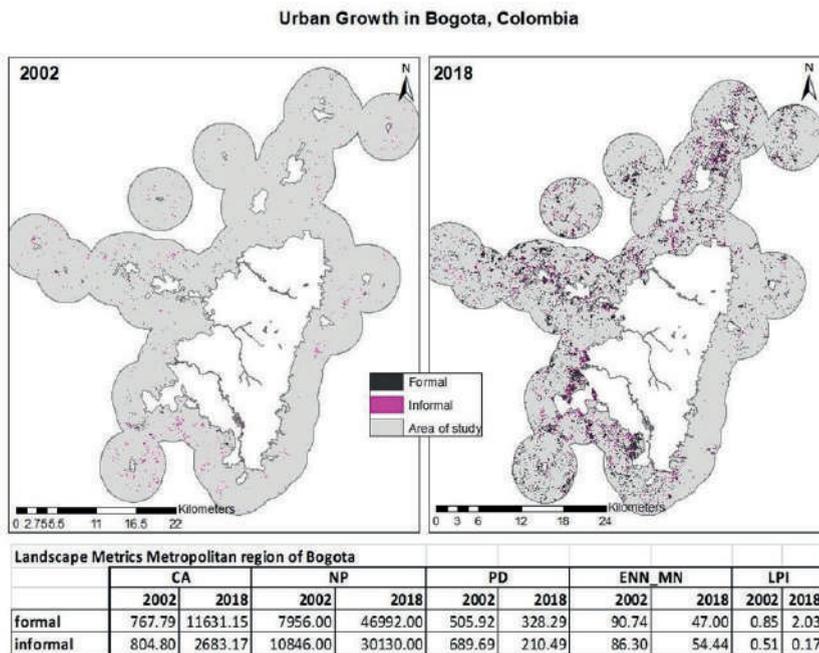


Figure 5. Formal and informal settlements in Bogota, 2002 and 2018.

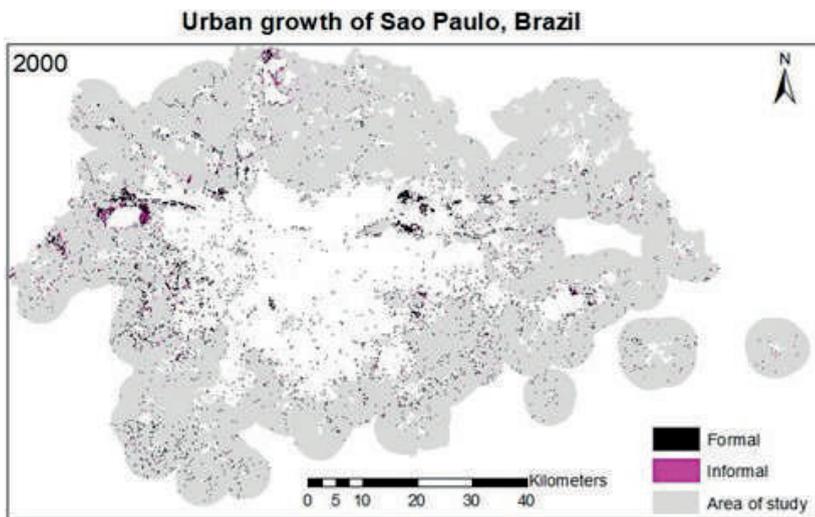
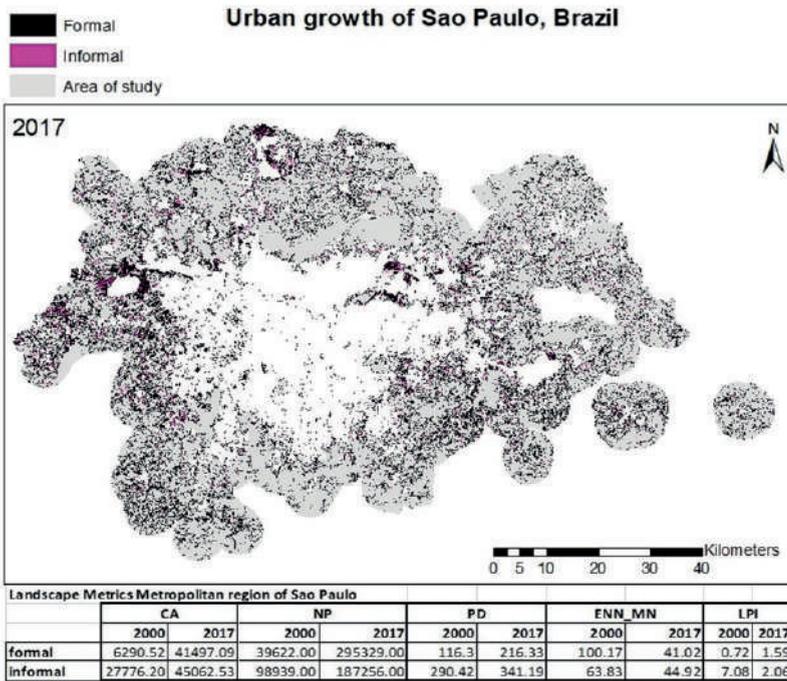


Figure 6a. Formal and informal settlements in Sao Paulo, 2000.



**Figure 6b.** Formal and informal settlements in Sao Paulo, 2017.

which formed bigger clusters due to the suburbanization of the periphery with big housing projects. In addition, informal settlements were located mainly in the south of the metropolitan area, not forming large clusters closer to the main roads. Meanwhile, formal settlements exhibited a dispersed distribution in the expansion area.

In Sao Paulo, the urbanized area increased 2.5 times between 2000 and 2017. the expansion was higher towards the south due to the mountainous topography and forest preserves located in the north (Figure 6). Formal development was higher than informal development. Sao Paulo's urban growth is more continuous than Bogota growing. Formal clusters were located close to commercial and industrial conglomerations on the city's east side. In the same way, Informal developments in Sao Paulo formed more continuous structures than Bogota's informal settlements; but they were located close to main roads and the city limit.

### 3.2 Environmental risk segregation

The results showed in Sao Paulo more formal urban expansion in higher Environmental risk areas. Meanwhile, in Bogota, informal expansion was in areas with lower environmental risk (Table 3).

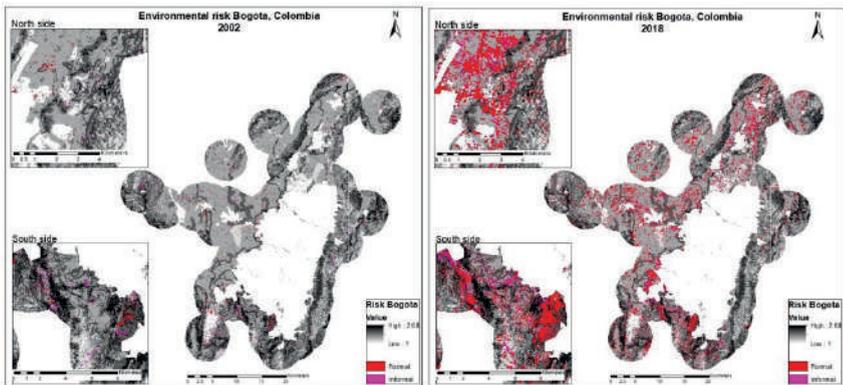
**Table 3.** Statistics of environmental risk in Bogota and Sao Paulo for formal and informal settlements

Bogota's Environmental Risk on a scale from 1 to 3				
	Mean		Standard Deviation (STD)	
	2002	2018	2002	2018
Formal	1.65	1.648	0.23	0.27
Informal	1.75	1.649	0.24	0.27

Sao Paulo Environmental Risk on a scale from 1 to 3				
	Mean		Standard Deviation (STD)	
	2000	2017	2000	2017
Formal	1.68	1.79	0.36	0.39
Informal	1.73	1.75	0.35	0.37

In Bogota, the average environmental risk decreased over the years, which means that recently, more informal settlements built their houses in areas with a lower risk than before (Figure 7). In Sao Paulo, sites exclusively for informal developments in 2000 mixed with predominant formal regions in 2017 (Figure 8a and Figure 8b).



**Figure 7.** Environmental risk for formal and informal developments in Bogota, 2002 and 2018.

In both cities, formal development did not have a preference in location. Formal developments located on the north and east sides of Sao Paulo and the northeast side of Bogota were mainly recreational houses residential buildings with a suburban structure (reticular structure-more vegetation between constructions.) Therefore, other conditions such as the quality of the construction creates extra disadvantages for a high environmental risk that will be included in future research. The spatial analysis of the environmental risk of settlements in Bogota and Sao Paulo indicated that formal settlements did not push informal settlements to riskier areas based on the criteria considered

in this study. In the case of Sao Paulo, the statistic showed an opposite pattern those formal areas settled to locations with higher environmental risk.

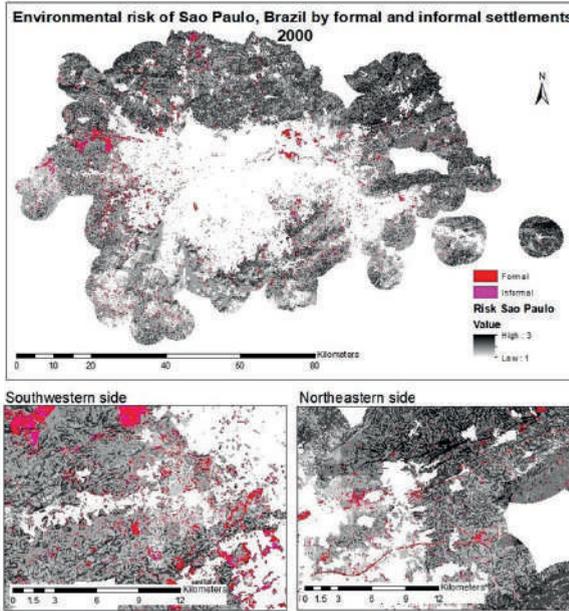


Figure 8a. Environmental risk for formal and informal developments in Sao Paulo, 2000.

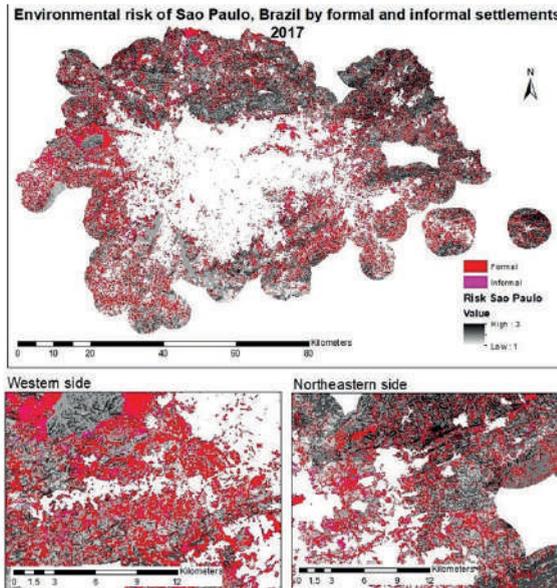
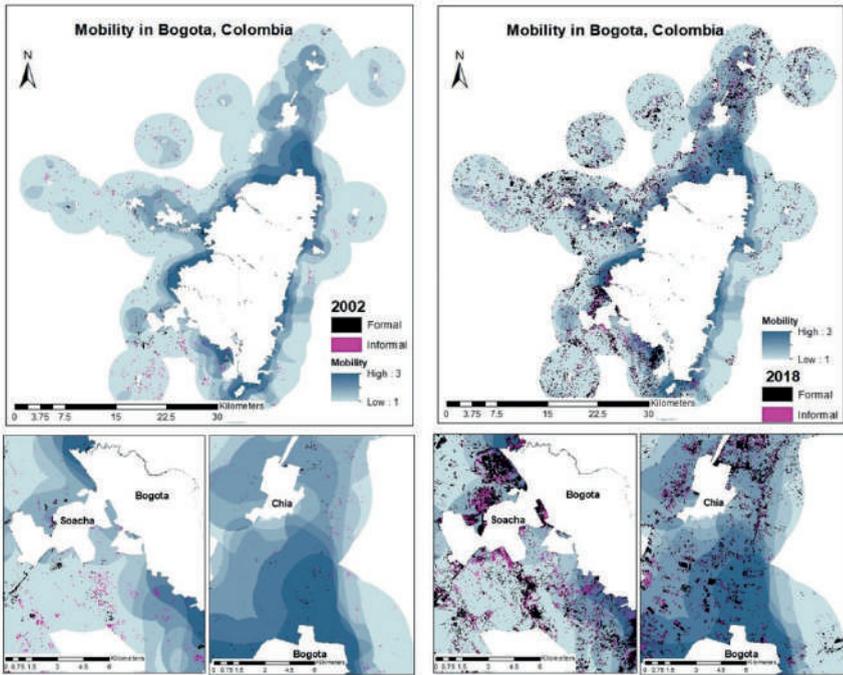


Figure 8b. Environmental risk for formal and informal developments in Sao Paulo, 2017.

### 3.3 Mobility segregation

Mobility of informal settlements improved over time in both urban areas. In general, people settled in areas with better mobility.



**Figure 9.** Mobility for formal and informal developments in Bogota, 2002 and 2018.

In Bogota, formal and informal developments have access to STP bus stops, routes, and highways connecting satellite cities in Bogota's metropolitan area (Figure 9). People in the metropolitan area settle more in areas with higher connection and transportation networks in the north. The mobility in the south is lower than the north. For that reason, urban growth in the south was not as prevalent to areas with high mobility than the north of the city. Still, the south sector had a sprawled formal development, not particularly close to any of the mobility elements analyzed in this study, creating a fragmented structure in the periphery.

The mobility in Sao Paulo shows a radial pattern, connecting satellite towns to the city center (Figure 10). The study showed that development in the periphery is not particularly associated with the BRT or main roads between towns. During the study period, the industrial activity of satellite towns accelerated formal urban development close to informal settlements in specific locations such as Barueri, Jandira, and Itapevi cities in the eastern side of the metropolitan area.

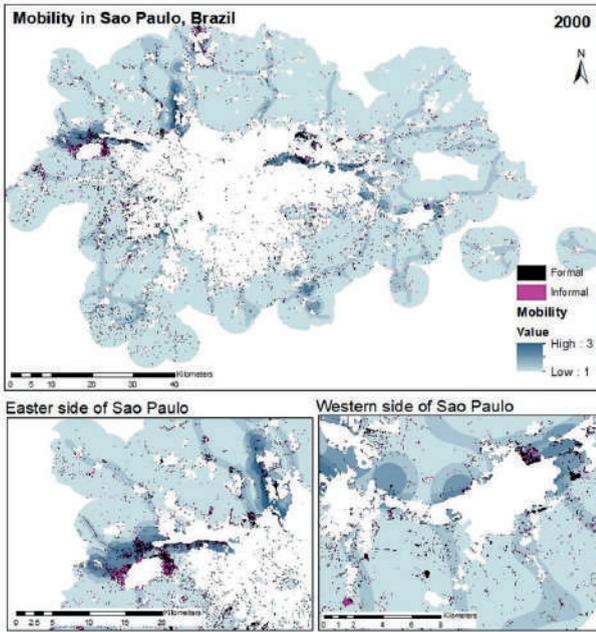


Figure 10a. Mobility for formal and informal developments in Sao Paulo, 2000.

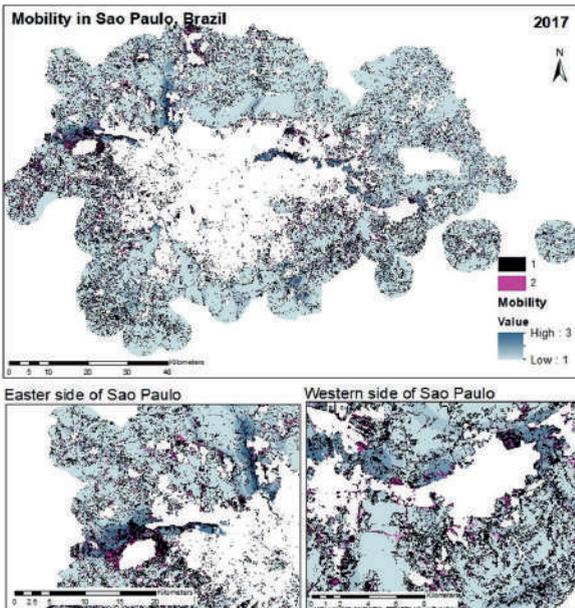


Figure 10b. Mobility for formal and informal developments in Sao Paulo, 2017.

**Table 4.** Statistics of mobility in Bogota and Sao Paulo for formal and informal settlements

Mobility of formal and informal locations in Bogota on a scale from 1 to 3				
	<i>Mean</i>		<i>Standard Deviation (STD)</i>	
	2002	2018	2002	2018
Formal	1.66	1.555	0.237	0.5272
Informal	1.454	1.653	0.245	0.5499
Mobility of formal and informal locations in Sao Paulo on a scale from 1 to 3				
	<i>Mean</i>		<i>Standard Deviation (STD)</i>	
	2000	2017	2000	2017
Formal	1.69	1.47	0.64	0.56
Informal	1.64	1.56	0.62	0.59

The Table 4 shows that mobility of poor residents has improved over the time. However, specific locations showed outlier patterns. For example, the industrial area at the west of Sao Paulo was populated principally by informal settlements in 2000, while formal developments had the most mobile locations in 2017. In Addition, in the south of Bogota, formal developments in 2018 occupied areas with the best mobility, and informal settlements are located in areas with low mobility. Nevertheless, those specific cases are beyond the scope of this research and a further study might be performed to prove a specific segregation pattern.

#### 4. Discussion

The results showed exponential growth of formal development in the periphery of Latin American cities, promoted by market-oriented policies that attracted middle and high-class populations to the fringe of cities. However, the pattern analysis showed that formal development was not located exclusively in areas with lower environmental risk or high mobility. Even more, the statistics revealed that on average, informal settlements were found in areas with better mobility over the years in Bogota. This study shows that segregation was not a generalized in the urban growth in the periphery of Bogota and Sao Paulo between 2000 and 2018

In general, the pattern of informal settlements was similar in Bogota and Sao Paulo. Poor residents built their houses in the periphery but close to the urban fringe and main highways connected to jobs, education, and health care. Meanwhile, formal development exhibited several spatial characteristics, including industries and commercial activities close to cities and highways, suburban recreational condominiums far from the city, suburban houses attracted by the view located in steep slopes, and middle-class in gated communities close to highways for a short commute to downtowns by car. Unlike informal settlements, formal development was situated on the periphery by preferences.

At the scale of the study, there is no generalized form of segregation in all expansion areas. However, it pinpoints locations that privilege formal

developments over informal settlements. The systematic segregation of informal settlements might not be generalized in all periphery, but it impacted more poor residents than other population. As Allen *et al.* (2017) suggested, the environmental risk is intensified by the construction conditions of informal housing.

Specific cases found in this study as outliers proved that segregation in the periphery of Latin American cities has had a similar pattern to the gentrification of city centers. First, the undeveloped land in the expansion of cities had an economic interest for investors, as Borsdorf and Hidalgo (2008) suggested. Second, the government opened regulations such as the Urban Strategic Plans and Zonal Plans, allowing enough freedom for private companies to develop in the expansion of cities. Third, the interest of private developers was to get a higher profit without considering the social difficulties of informal settlements caused by the new developments. Fourth, locations in the periphery were targeted as the most profitable, such as the north side of Bogota, and the such as Barueri, Jandira, and Itapevi sectors in Sao paulo. Fifth, the renewal of target areas responded to the trend that commodifies land according to the preference of high-income people. Finally, public services rates such as sewage and electricity are calculated by socio-economic strata of new developments, making it impossible for low-income residents to afford. The social inequalities mentioned by Jenks and Burgess (2003) and Klaufus (2013) were seen in this study as triggers of systematic spatial segregation in which profitable areas were targeted as commodities increasing the price lasnd and making imposible to poor population living in those areas.

In a city scale, the methodology used in this study was practical to locate target areas to have a more detail analysis. Landsat images proved to be functional in long-term observation of the city's urban growth. Enhanced images through pan-sharpening improved spatial resolution that made more accurate the study. This Geospatial analysis mythology can be replicated in other cities adding more different elements to evaluate. The mapping of informal settlements in specific areas may be improved with images of higher resolution in a smaller scale.

The research workflow showed how urban development affects or segregates particular population locations at a metropolitan scale. Further, it indicated that the causes of segregation are complex, with a variety of physical, political, economic, and social factors. The study focused on environmental risk and mobility of informal settlements. However, the same method could be applied to incorporate other factors, such as access to schools, hospitals, and source of jobs, to fully understand how segregation works. The variables also might be adjusted to use high-resolution images and integrate quality of constructions to identify susceptibility of informal settlements in steep slopes.

In Latin America, each country created specific market-oriented policies that reinforced capitalist urban development, such as partial plans in Colombia and Mexico. However, since the study only focused on two Latin American megacities, future studies may establish a stronger relationship between urban policies and segregating urban patterns in Latin America.

## 5. Conclusion

This study aimed to understand the patterns of development in the periphery of Latin American cities and whether informal settlements were forced to migrate to isolated areas or areas exposed to environmental hazards.

The study showed that segregation not was generalized pattern in the periphery of the Latin American cities. The displacement by social classes in in Bogota and Sao Paulo is complex, and systematic. At the study scale, informal settlements migrated to locations with better environmental conditions, and mobility.

The research was able to identify locations where poor residents were displaced. The methodology proved to be effective to locate sectors where segregation can be identified. Those areas will be study in the future in a focused manner on a smaller scale and with higher resolution images.

## References

- Amparo-Alves, J. (2013). From Necropolis to Blackpolis: Necropolitical governance and black spatial praxis in São Paulo, Brazil. *Antipode*, 46(2), 323–339.  
DOI: /10.1111/anti.12055
- Angotti, T. (2013). Urban Latin America. *Latin American Perspectives*, 40(2), 5-20.  
<http://dx.doi.org/10.1177/0094582x12466832>
- Aguilar, A. G., Ward, P. M., & Sr, C. S. (2003). Globalization, regional development, and megacity expansion in Latin America: Analyzing Mexico City's peri-urban hinterland. *Cities*, 20(1), 3–21.  
[http://dx.doi.org/10.1016/s0264-2751\(02\)00092-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0264-2751(02)00092-6)
- Allen, A., Belkow, T., Escalante Estrada, C., de los Ríos, S., Kamiya, M., Miranda, L., Wesely, J. & Zilbert Soto, L. (2017). De la mitigación de desastres a la interrupción de trampas de riesgo: La experiencia de aprendizaje-acción de clima sin riesgo. *REDER*, 1(1), pp.6-28. Comisión Económica para América Latina y el Caribe, CEPAL (2018). La pobreza aumentó en 2016 en América Latina y alcanzó al 30,7% de su población, porcentaje que se mantendría estable en 2017. <https://www.cepal.org/es/comunicados/la-pobreza-aumento-2016-america-latina-alcanzo-al-307-su-poblacion-porcentaje-que-se>.
- Bassett, T. E., & Marpillero-Colomina, A. (2013). Sustaining mobility: Bus rapid transit and the role of local politics in Bogotá. *Latin American Perspectives*, 40(2), 135–145.  
<http://dx.doi.org/10.1177/0094582X12468867>
- Borsdorf, A., & Hidalgo, R. (2008). New dimensions of social exclusion in Latin America: From gated communities to gated cities, the case of Santiago de Chile. *Land Use Policy*, 25(2), 153–160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.landusepol.2007.04.001>
- Budds, J., & Teixeira, P. (2005). Ensuring the right to the city: Pro-poor housing, urban development and tenure legalization in São Paulo, Brazil. *Environment and Urbanization*, 17(1), 89–114. <http://dx.doi.org/10.1177/095624780501700105>
- Castro-Correa, C., Ibarra, I., Lukas, M., Ortiz, J., & Sarmiento, J. P. (2015). Disaster risk construction in the progressive consolidation of informal settlements: Iquique and Puerto Montt (Chile) case studies. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 13(1), 109–127. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdr.2015.05.001>

- Codina, P. R. (2005). *Formalizing the informal city: designing for development in a Peruvian shantytown* (thesis). University of Maryland.  
<https://drum.lib.umd.edu/handle/1903/2702>
- Gilbert, A. (1998). *The Latin American city*. Monthly Review Press. United Kingdom.
- Guzman, L. A., Oviedo, D., & Rivera, C. (2017). Assessing equity in transport accessibility to work and study: The Bogotá region. *Journal of Transport Geography*, 58, 236-246. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2016.12.016>
- Hardoy, J., & Pandiella, G. (2009). Urban poverty and vulnerability to climate change in Latin America. *Environment and Urbanization*, 21(1), 203-224.  
<http://dx.doi.org/10.1177/0956247809103019>
- Hyman, J. (2018). *Cartographies of power: Unequal urban development and the racialization of space in São Paulo* (thesis). University of San Francisco.
- Inostroza, L., Baur, R., & Csaplovics, E. (2010). Urban sprawl and fragmentation in Latin America: A comparison with European cities. The myth of the diffuse Latin American city. *Journal of environmental management*, 115, 87-97.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.007>
- Inostroza, L. (2016). Measuring urban informality in Latin America. GIS spatial assessment of informal urban development in Santiago De Chile. *Procedia Engineering*, 161(1), 1631-1638. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.638>
- Inostroza, L., & Tábbita, J. H. (2016). Informal urban development in the Greater Buenos Aires Area: A quantitative-spatial assessment based on households' physical features using GIS and principal component analysis. *Procedia Engineering*, 161, 2138-2146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.806>
- Jaitman, L. (2015). Urban infrastructure in Latin America and the Caribbean: Public policy priorities. *Latin American Economic Review*, 24(1), 13.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s40503-015-0027-5>
- Jenks, M., & Burgess, R. (2003). *Compact cities: Sustainable urban forms for developing countries*. Spon Press. New York, NY. <http://search.ebscohost.com/login.aspx?Direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=77274>
- Klaufus, C. (2013). The Right to a city: Changing peri-urban landscapes in Latin America. In book: *Rethinking urban inclusion: Spaces, mobilizations, interventions*. CES Centre for Social Studies, University of Coimbra. 487-503.  
<http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.1.1789.3847>
- Kohli, D., Sliuzas, R., Kerle, N., & Stein, A. (2012). An ontology of slums for image-based classification. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(2), 154-163. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2011.11.001>
- Koch, J. (2013). *Transportation in the favelas of Rio de Janeiro*. Lincoln Institute of Land Policy. Cambridge, MA.  
[https://www.lincolninst.edu/sites/default/files/pubfiles/koch\\_wp13jk1.pdf](https://www.lincolninst.edu/sites/default/files/pubfiles/koch_wp13jk1.pdf)
- Lopez-Morales, E., Shin, H. B., & Lees, L. (2016). Latin American gentrifications. *Urban Geography*, 37(8), 1091-1108.  
<http://dx.doi.org/10.1080/02723638.2016.1200335>
- Maceratini, E. (2011, July). Informal city: The cases of Bogotá and Rio de Janeiro. The International RC21 conference. Amsterdam Institute for Social Science Research – Urban Studies, University of Amsterdam – The Netherlands.  
<http://www.rc21.org/conferences/amsterdam2011/edocs/Session%2029/RT29-1-Maceratini.pdf>

- Mahabir, R., Croitoru, A., Crooks, A. T., Agouris, P., & Stefanidis, A. (2018). A Critical review of high and very high-resolution remote sensing approaches for detecting and mapping slums: Trends, challenges and emerging opportunities. *Urban Science*, 2(1), 8. <http://dx.doi.org/10.3390/urbansci2010008>
- Montaña, M. C., & Borrero, O. A. (2015). *Los planes parciales en Colombia: Evaluación de la aplicación de planes parciales y reajuste del suelo en siete ciudades Colombianas, 2006-2013*. Instituto de Estudios del Ministerio Público. Cámara de Comercio de Bogotá. Bogotá. <https://bibliotecadigital.ccb.org.co/handle/11520/13166>
- Moreno, C., & Miralles-Guasch, C. (2017). The bicycle as a real feeder to the transmillenio system in Bogota and Soacha. *International Journal of Transport Development and Integration*, 1(1), 92-102. <http://dx.doi.org/10.2495/TDI-V1-N1-92-102>
- Rojas, C., Muñiz, I., & Pino, J. (2013). Understanding the urban sprawl in the mid-size Latin American Cities through the urban form: Analysis of the Concepcion Metropolitan Area (Chile). *Journal of Geographic Information System*, 5(3), 222–234. <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2013.53021>
- Silva, H. M. B., & Ceneviva, L. V. 1996. Favelas y fraccionamientos irregulares en São Paulo. In *El acceso de los pobres al suelo urbano*. Centro de estudios mexicanos y centroamericanos, 169-218. <http://dx.doi.org/10.4000/books.cemca.929>
- Tomasiello, D. B., Giannotti, M., Arbex, R., & Davis, C. (2019). Multi-temporal transport network models for accessibility studies. *Transactions in GIS*, 23(2), 203–223. <http://dx.doi.org/10.1111/tgis.12513>
- Wenzel, F., Bendimerad, F., & Sinha, R. (2007). Megacities–megarisks. *Natural Hazards*, 42(3), 481–491. <http://dx.doi.org/10.1007/s11069-006-9073-2>
- Yañez-Pagans, P., Martínez, D., Mitnik, O. A., Scholl, L., & Vazquez, A. (2019). Urban transport systems in Latin America and the Caribbean: Lessons and challenges. *Latin American Economic Review*, 28(1), 15. <http://dx.doi.org/10.1186/s40503-019-0079-z>



# **Análisis espaciotemporal del proceso de pérdida forestal en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Michoacán, México**

Spatio-temporal analysis of the process of forest loss in the municipalities of Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro and Zinapécuaro. Michoacan, Mexico

Araceli Benítez Franco<sup>1</sup>

*Recibido 3 de octubre de 2022; aceptado 17 de noviembre de 2022*

## **RESUMEN**

En el estado de Michoacán, México, se ha incrementado la pérdida de superficie forestal por el cambio de uso de suelo y la expansión de cultivos permanentes, en particular el cultivo de aguacate. Los modelos espacio-temporales permiten conocer cuáles son las interacciones que influyen en la ocurrencia de este fenómeno de cambio de uso de suelo y visualizar los patrones espaciales resultantes. En la presente investigación se identificaron los cambios de uso de suelo de 1994 a 2015 en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro del estado de Michoacán. Con esta información se construyó el modelo DEFORELATIONS, con el que se analizaron diversas relaciones espaciales presentes en el área de estudio, se identificaron los factores que han influido en la pérdida de dos categorías de cubierta forestal, bosque y bosque abierto; por último, se hizo una predicción de las áreas susceptibles a la pérdida forestal y su grado de probabilidad a la pérdida forestal. De la aplicación del modelo, de diez relaciones espaciales analizadas sólo la proximidad de la cubierta forestal a los asentamientos humanos, proximidad a los caminos, y proximidad a los cultivos permanentes y anuales resultaron estadísticamente relevantes para la pérdida de bosque. Para el caso de la pérdida de bosque

<sup>1</sup> Universidad Nacional Autónoma de México, México. Correo electrónico: [geografa.araceli@gmail.com](mailto:geografa.araceli@gmail.com).  
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4043-7202>.

abierto resultaron relevantes estas mismas relaciones, con excepción de la proximidad a los caminos.

Palabras clave: *Pérdida de cubierta de forestal, relaciones espaciales, DEFORELATIONS.*

## ABSTRACT

In the state of Michoacan, Mexico, the forest loss has increased due to the change in land use caused by the expansion of permanent crops, particularly avocado cultivation. The spatio-temporal models allow us to know what are the interactions influencing the occurrence of this phenomenon of land use change and help to visualize the resulting spatial patterns. In this research, changes in land use were identified from 1994 to 2015 in the municipalities of Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro and Zinapécuaro in the state of Michoacán. Within the above context, a DEFORELATIONS model was built, where the spatial relationships present in the study area were analyzed, and those factors that have influenced the loss of forest and open forest were identified. Finally, a prediction was done of the areas susceptible to forest loss and their degree of probability of forest loss. From the application of the model, from the 10 spatial relationships analyzed, only proximity of forest cover to human settlements, proximity to roads, and proximity to permanent and annual crops, were relevant to forest loss. In the case of the loss of open forest, the same relationships were relevant, with exception of proximity of forest to roads.

Key words: *forest cover loss, spatial relations, DEFORELATIONS.*

## 1. Introducción

A nivel mundial de 1990 a 2015 la tasa de pérdida neta de bosques ha disminuido en más de un 50 por ciento, se tiene el registro de una pérdida neta de unos 129 millones de hectáreas de bosque (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2016). Los ecosistemas forestales cada vez se ven más perjudicados por cambios como la conversión de la cobertura del terreno, degradación, tala inmoderada e ilegal del arbolado para el mercado de madera y sobrepastoreo. Estos procesos, de deforestación o degradación forestal, se asocian a impactos ecológicos importantes en prácticamente todas las escalas (Lambin, 1997, como se citó en Rosete *et al.*, 2008).

El estado de Michoacán posee una superficie forestal importante, ya que en el 2011 representaba el 2% (3,405,824 hectáreas) de la superficie de bosque en México, donde en el país en el año 2011 se registraron 140,581,638 hectáreas (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2013). No obstante, este recurso se ha visto afectado por diferentes procesos de deforestación y en los últimos años, por el desarrollo acelerado del cultivo del aguacate. Para el 2011 se estimó una cifra de 153,018 hectáreas de superficie cultivada de aguacate en el estado, de las cuales al menos 50,000 hectáreas pueden atribuirse a la introducción del cultivo en zonas forestales (Morales *et al.*, 2012). Otro estudio donde se obtuvieron tasas de cambio que describen la pérdida de cubierta forestal a nivel regional en el estado de Michoacán fue Mas *et al.*, (2016) el cual realizó un

monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación usando un modelo híbrido (interpretación digital y visual) por medio de un análisis de imágenes satelitales. Sin embargo, no se han realizado estudios en un área de interés de menor escala en Michoacán que puedan precisar los factores que podrían contribuir en la pérdida forestal.

Con el estudio sobre el cambio global forestal de la Universidad de Maryland en los Estados Unidos (Hansen *et al.*, 2013), fue posible observar que del año 2000 a 2012 hubo una pérdida forestal importante en la parte noreste de Michoacán sobre todo en los municipios de Charo, Indaparapeo, Queréndaro, Zinapécuaro, e Hidalgo, además que las últimas actualizaciones a 2021 se sigue presentando pérdida de bosque en esta zona. Para estos municipios sería muy útil desarrollar un modelo que explore esta dinámica de cambio y con ello facilitar la predicción de las áreas forestales que se encuentran en peligro de ser deforestadas.

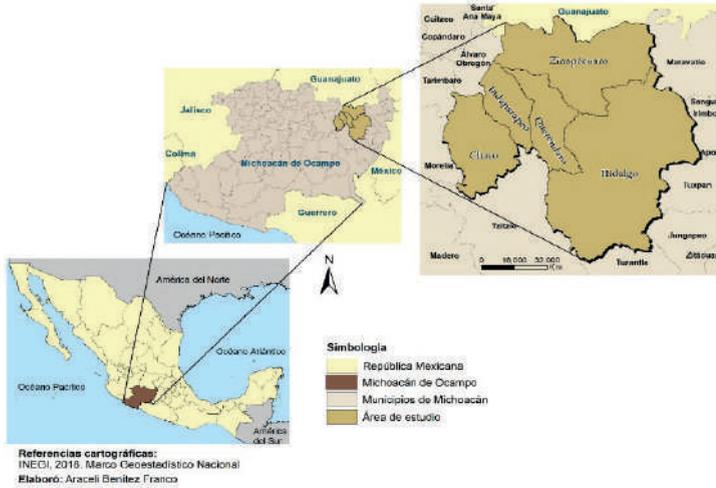
En el año 2013, Morales construyó un modelo general para estudiar los factores que son relevantes en el proceso de deforestación, con el nombre de DEFRELATIONS, el cual permite identificar áreas con tendencia a este proceso. Este modelo se basa principalmente en identificar las relaciones espaciales relevantes en el proceso de deforestación en un determinado lugar, y para su validación se utilizan pruebas estadísticas. Vizcaino (2013) utilizó este modelo para dos zonas, evaluó las relaciones espaciales implicadas en la pérdida de bosque. Obteniendo que las relaciones relevantes para la reserva de biósfera de los Tuxtlas en Veracruz, México, fueron la pendiente del terreno y la proximidad a zonas agropecuarias, mientras que, en la otra zona, que fue un corredor ecológico en Brasil, resultaron relevantes la proximidad a las vías de comunicación y a las zonas agropecuarias. Otro estudio adaptó el mismo modelo fue Reyes (2014) en dos zonas de distinto clima y cubierta forestal (bosque templado y selva baja), y las relaciones espaciales relevantes para la zona templada fue solamente la altitud y para la zona tropical solo la proximidad a los caminos.

Para esta investigación se planteó realizar un análisis de las zonas forestales en los municipios de Charo, Indaparapeo, Queréndaro, Zinapécuaro, e Hidalgo, para determinar los cambios que han sucedido en dichas superficies de 1994 a 2015, con el propósito de identificar los factores espaciales que han influido en el cambio de la cubierta forestal a otro tipo de uso de suelo. Por último, con esta información se construye un modelo para definir factores, y con ello predecir áreas susceptibles a la pérdida forestal.

## 2. Métodos

### 2.1 Área de estudio

Los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro, área de estudio, están ubicados en la parte noreste del estado de Michoacán, México (Figura 1), tienen en conjunto una superficie de 2,457 km<sup>2</sup>, la cual ocupa el 4.21 % de la superficie del estado de Michoacán (INEGI, 2013).



**Figura 1.** Área de estudio.

El área de estudio tiene 11 tipos de suelos, donde los que predominan son el Andosol, el Vertisol y Luvisol, y en poca concentración se tiene el Planosol, Durisol y Solonchak (INEGI, 2007a). Se tiene siete unidades climáticas, en general el clima es templado subhúmedo (INEGI, 2007b), en este tipo de clima las temperaturas van entre 10° y 18 °C y de 18° a 22 °C. Sin embargo, en algunas regiones puede disminuir a menos de 10 °C; registra precipitaciones de 600 a 1,000 mm en promedio durante el año (Servicio Meteorológico Nacional [SMN], 2010). La vegetación del área de estudio es bosque de encino, pino, oyamel, pino-encino, encino-pino; también cuenta con una gran variedad de vegetación secundaria arbustiva, vegetación secundaria arbórea, pastizales y con pequeñas áreas de tulares (INEGI, 2013).

## 2.2 Procedimiento metodológico

La metodología consta de tres etapas generales, la primera es la determinación de la ubicación y características de las zonas forestales que han experimentado deforestación, mediante un estudio de cambio de la cubierta forestal con fotografías aéreas e imágenes satelitales desde 1994 a 2015; la segunda es la construcción del modelo DEFORELATIONS (Morales, 2013) para la exploración de las relaciones espaciales que intervienen en el proceso de deforestación y por último la aplicación del modelo para la determinación de la probabilidad de pérdida forestal a futuro.

## 2.3 Determinación del cambio de uso y cobertura del suelo en zonas forestales y caminos

Para clasificar el uso de suelo y cubierta de suelo y caminos de 1994 y 2015 en este caso particular se consideran las siguientes clases: cultivos anuales, cultivos

permanentes, matorrales-pastizales, cuerpos de agua, asentamientos humanos, bosque y bosque abierto. Este último se distingue por la distribución discontinua de los árboles (FAO, 1998). Estas clases se digitalizan con interpretación visual con ortofotos aéreas de INEGI de 1994 e imágenes SPOT 5 del 2014 a una escala de 1:20,000, esto se realiza en un sistema de información geográfica. Cuando algunas zonas estaban cubiertas de nubes se utilizó las de SPOT 6 del 2014. La capa 2014 obtenida se actualiza con imágenes de Landsat 7 del año 2015, teniendo como referencia la visualización en Google Earth.

Para determinar el cambio entre las dos fechas, se ponen valores a cada tipo de usos y cubiertas de suelo obtenidas en formato vectorial para ambas fechas. Se realiza una intersección de las dos temporalidades y se suman los valores de cada fecha, si el resultado es un valor diferente a lo que se esperaba es que hubo un cambio y si el valor es el esperado es que no hubo cambio. Con este resultado se obtiene las zonas de cambio en las cubiertas y usos de suelo dentro del área de estudio, principalmente en las cubiertas forestales, que son el enfoque en esta investigación. Para obtener los caminos, de igual manera se realizó una interpretación visual con las ortofotos e imágenes SPOT y Landsat ya mencionadas, para obtener las capas correspondientes a 1994 y 2015.

## **2.4 Construcción del modelo DEFORELATIONS**

El modelo DEFORELATIONS es un modelo exploratorio y predictivo que estima la probabilidad de deforestación considerando como parámetros las relaciones espaciales locales identificadas como relevantes a partir de los patrones de cambio en la cubierta forestal (Morales, 2013). El modelo se construye dependiendo del contexto de la zona de estudio, puesto que cada lugar tiene sus características geográficas particulares, y por lo tanto la estimación de la probabilidad de deforestación dependerá de los patrones que se estén presentando en dicho lugar. Por lo tanto, no existe un solo modelo aplicable a todos los lugares ni a cualquier período de tiempo. Para esta investigación se estructura el modelo DEFORELATIONS y para su desarrollo se siguieron las fases de relevancia (identificación de los parámetros), influencia (funciones de probabilidad) y ponderación (especificación de los pesos de cada parámetro). En este estudio en particular se considera la deforestación en bosque y bosque abierto, por lo cual la metodología del modelo DEFORELATIONS se aplica para ambos casos.

### **2.4.1 Determinación de la relevancia**

Para determinar las relaciones espaciales relevantes para el modelo DEFORELATIONS, es necesario la obtención de los siguientes insumos cartográficos: la pérdida de bosque y bosque abierto (resta de cubierta de 1994 menos la del año 2015); pérdida de bosque y bosque abierto aleatoria, estas capas se obtuvieron con una simulación de la posición aleatoria (con distribución uniforme) a partir de cada capa raster de pérdida real de bosque y bosque abierto convirtiendo en punto cada celda y distribuyendo aleatoriamente en las capas de bosque y bosque abierto de 1994; con la capa de mínima distancia-

costo sobre el terreno en este caso se tomaron los ríos de la red hidrográfica, (INEGI, 2010) y la capa de caminos de 1994. Se asigna el valor No Data a lo que funcione como barrera en este caso a los ríos, con valor 0 donde no represente una barrera como lo es la superficie del área de estudio y a la intersección de caminos con ríos. Otras capas necesarias fueron las de uso y cubiertas de suelo de 1994; orientación de las pendientes obtenidas a partir del Modelo Digital de Elevación del satélite ASTER, 2018; la altitud; los diferentes tipos de suelo del área de estudio de INEGI (2007a) y por último la capa de la tenencia de la tierra del Registro Agrario Nacional (2018). Todos estos insumos se convierten a un formato raster con un tamaño de celda de 30 metros. Además, para los cinco municipios del área de estudio se generó un buffer de dos kilómetros, con la finalidad de que al momento de realizar los análisis para el modelo tener un margen de confiabilidad y evitar el error del efecto límite en el análisis espacial.

Cuando se considera el tiempo para un análisis de cambio, es esencial incorporar técnicas que enfatizan no solo los efectos que producen un cambio, sino también el análisis de los patrones que se presentan en donde este cambio sucede. Por ello es necesario determinar, *a priori*, cuáles son las relaciones espaciales que hipotéticamente influyen en el proceso de pérdida forestal. Las clases de relaciones espaciales que podemos encontrar en el espacio-tiempo son proximidad, orientación, exposición, adyacencia, contención, coincidencia, conectividad, agregación y asociación (Morales, 2014).

Para esta investigación se utilizaron relaciones espaciales de proximidad (sirven para analizar el efecto de la separación entre eventos espaciales), calculando la distancia existente entre las zonas de pérdida forestal y otros elementos en el territorio: los asentamientos humanos, los caminos, los cultivos anuales y los permanentes, las zonas de matorral-pastizal y las de bosque abierto, de manera individual este último solamente para el caso de pérdida de bosque estrictamente hablando. También, se emplean relaciones espaciales de coincidencia (posible interacción entre eventos que comparten el mismo espacio al mismo tiempo), donde se analizaron mediante la sobreposición de las zonas de pérdida de bosque y bosque abierto con los elementos espaciales de altitud, pendiente y orientación del terreno, suelos y tenencia de la tierra, de manera individual.

Otro proceso que se requirió realizar fue el cálculo de la capa de costo de accesibilidad para cada uno de los elementos considerados (asentamientos humanos, caminos, cultivos anuales y permanentes, matorral-pastizal y bosque abierto) de la fecha anterior, en este caso 1994, para así obtener las capas de costo-distancia mínimos de cada uno de estos elementos. El segundo procedimiento es hacer una multiplicación de cada una de las capas resultantes del proceso anterior con la capa de la pérdida forestal real y con la de pérdida forestal aleatoria (estas últimas dos capas son capas raster con valores de celda de 1 para las zonas en donde hay pérdida forestal real o hipotética), para obtener los valores de distancia-costo mínimos de las áreas de pérdida forestal, tanto real como aleatoria. Las capas resultantes se reclasifican en intervalos de clases con los mismos rangos de cada relación espacial, tanto en la capa

aleatoria como real, ya que esto servirá para comparar las distribuciones de cada evento en histogramas de frecuencia.

En el caso de las relaciones de coincidencia, los resultados se obtienen con la multiplicación directa de las capas de pérdida forestal real y aleatoria con cada uno de los elementos en relación de coincidencia (altitud, pendiente y orientación del terreno, suelos y tenencia de la tierra).

Con los resultados de los procedimientos anteriores, se prosigue a la elección de las relaciones espaciales relevantes. La evaluación de su relevancia se hace mediante pruebas estadísticas, con la finalidad de identificar cuáles se incluirán en el modelo como parámetros, es decir que tan significativa parece ser su contribución al proceso de deforestación. Para las relaciones espaciales de las capas de pérdida forestal real y aleatoria con los diferentes elementos espaciales se generan histogramas de frecuencia. Si los histogramas de frecuencia de ambas distribuciones son muy similares, hipotéticamente la distribución de pérdida forestal dada por la relación espacial analizada probablemente no sea relevante; si por el contrario ambas distribuciones difieren notoriamente, entonces la posibilidad de que la relación en cuestión sea relevante será muy fuerte, puesto que no se parece a un proceso aleatorio de pérdida forestal.

El segundo paso es realizar pruebas de normalidad de las distribuciones de frecuencia real y aleatoria de las relaciones espaciales modeladas anteriormente, si el resultado en ambas distribuciones es normal se comparan mediante la prueba T de Student y la prueba F de Fisher. En el caso de que las pruebas de normalidad sean negativas para una o ambas distribuciones, se emplean las pruebas no paramétricas U de Mann – Whitney (Wilcoxon) y la prueba Dn de Kolmogorov–Smirnov. Con estas pruebas se evalúa la similitud de los valores de la distribución real y aleatoria de cada relación, esto para comprobar su relevancia para el modelo. Si en los resultados obtenidos se encuentran diferencias significativas en las dos pruebas, es decir se rechaza la hipótesis nula (el nivel de confianza usualmente es de 95%, aunque esto puede relajarse en el modelo), la relación se toma como un parámetro para nuestro modelo DEFORELATIONS.

Cuando la diferencia significativa solo se da en una de dos pruebas estadísticas, se puede optar por elegir o no la relación espacial para considerarla como parámetro. En la práctica esto quiere decir que la contribución de esta relación al proceso de deforestación no es tan clara, o espacialmente si lo es en algunas porciones del territorio bajo estudio, pero en otras no. En este caso particular se tomarán los niveles de relevancia: 95% si  $P \leq 0.05$ , la relación es muy relevante, 85% si  $P \geq 0.05$  pero  $P \leq 0.15$ , la relación es relevante. 75% si  $P \geq 0.15$  pero  $P \leq 0.25$ , la relación es suficientemente relevante. De aquí en adelante, las relaciones espaciales que resultan relevantes se consideran como parámetros del modelo.

#### 2.4.2 Determinación de la influencia de los parámetros

Se consideran solo las relaciones espaciales que resultaron relevantes (parámetros del modelo). El siguiente paso es ajustar para cada parámetro una función matemática que mejor describa la distribución de valores de la relación.

Esta se obtiene mediante un procedimiento de ajuste de una curva por mínimos cuadrados. Como es posible elegir múltiples funciones con ajuste aceptable, se selecciona la de mínimo número de términos y con el mayor R2 ajustado, de manera que la ecuación se ejecute con relativa facilidad en el modelo mediante un SIG.

### 2.4.3 Ponderación de los parámetros relevantes

Una vez estimada la influencia, se asignan pesos (suma total de valor de 1) en las ecuaciones, utilizando los estadísticos  $D_n$  de una prueba de Kolmogorov-Smirnov, las cuales se obtuvieron de comparar las distribuciones real y aleatoria de la pérdida forestal en las pruebas en donde las distribuciones resultaron no normales. Pero si las distribuciones de los parámetros relevantes resultaron normales, entonces es necesario realizar el análisis para obtener dicho valor estadístico de  $D_n$ . La lógica de ponderar mediante este procedimiento se basa en que mientras mayor sea la distancia entre las distribuciones estadísticas acumuladas de las distribuciones de valores de las relaciones espaciales real y aleatoria de pérdida forestal, la contribución de la relación es menos aleatoria y, por lo tanto, mayor contribución o peso debe tener en el modelo de predicción de la pérdida forestal.

### 2.4.4 Aplicación del modelo

Con los pesos de cada parámetro, el paso final es la construcción del modelo de probabilidad de deforestación de bosque y otro para la deforestación de bosque abierto. Para esta construcción se tiene dos modos de obtener resultados, el modo paramétrico y el modo sintético. El primero se ejecuta con las funciones matemáticas ya elegidas, que establecen la probabilidad de deforestación según cada parámetro de forma individual, obteniendo como resultante un mapa de probabilidad de deforestación específico de cada parámetro. La intención de este modo paramétrico es poder explorar la contribución individual de cada parámetro en la probabilidad de pérdida forestal.

Es importante resaltar que en esta etapa el cálculo de cada capa de los parámetros del modelo se hace con capas que muestran las relaciones de proximidad correspondientes a los parámetros con el año 2015, puesto que se trata de predecir la probabilidad de deforestación de áreas de bosque o bosque abierto en ese año o a futuro.

En el modo sintético se realiza una suma, mediante el procedimiento de combinación lineal ponderada, de todos los parámetros relevantes considerando la ponderación de cada parámetro relevante, es decir, el resultante de cada ecuación e integrando a cada uno sus pesos correspondientes (Ecuación 1):

$$PD = WiPi + Wi_{+1}Pi_{+1} \dots WnPn \quad (1)$$

PD = Probabilidad de deforestación de la cubierta forestal

Wi = Peso del parámetro i,  $i = 1 \dots n$

Pi = Parámetro (es decir la relación espacial relevante para el modelo resultante de la ecuación elegida)

Obteniendo como resultados finales un mapa de probabilidad integral ponderado de pérdida forestal tanto para el bosque como para el bosque abierto.

### 3. Resultados

#### 3.1 Obtención de la cubierta y uso de suelo y caminos

Los primeros resultados obtenidos fueron las cubiertas y uso de suelo y los caminos, los cuales se muestran en la Figura 2 y Figura 3.

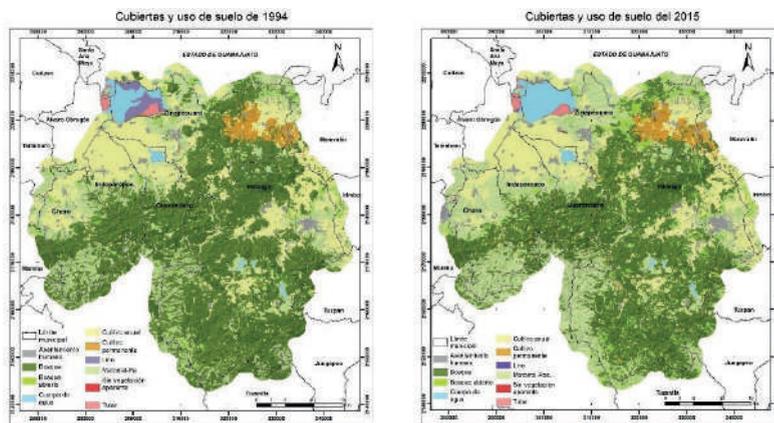


Figura 2. Cubiertas de uso de suelo de 1994 y 2015.

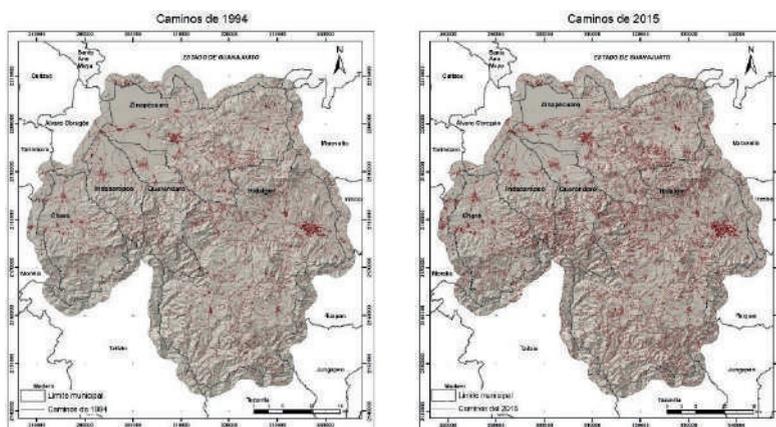
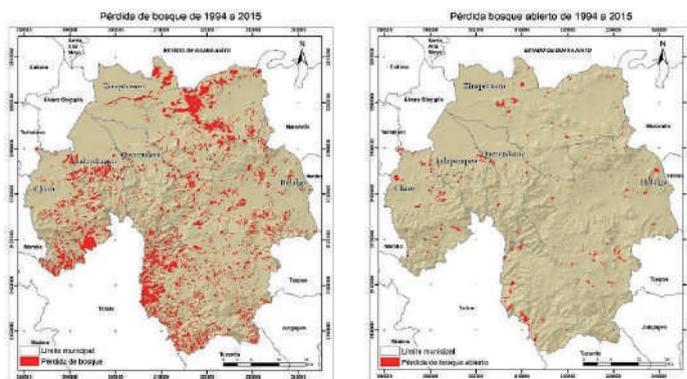


Figura 3. Caminos de 1994 y 2015.

En el área de estudio, los caminos en el año de 1994 tenían una longitud de 7,046.39 km, y para el 2015 fue de 11,520.28 km lineales, lo cual representa un incremento de un 63% (4,473 km). Lo que respecta a los cambios en las cubiertas y uso de suelo en la Tabla 1 se aprecia que





**Figura 5.** Pérdida de cubierta forestal de 1994 a 2015.

### 3.2 Construcción del modelo

A continuación, se explican los resultados obtenidos de cada fase y los insumos cartográficos realizados para la construcción del modelo DEFORELATIONS.

#### 3.2.1 Análisis de la relevancia

Para esta fase se generaron las capas de las relaciones espaciales de proximidad y coincidencia, tanto para pérdida de bosque y bosque abierto, en sus distribuciones real y aleatoria. En la Tabla 2 y Tabla 3 se muestra el resultado y las pruebas estadísticas utilizadas para obtener la relevancia de las relaciones espaciales. Aquellas relaciones espaciales que resultaron relevantes, a partir de este momento se convierten en parámetros del modelo.

**Tabla 2.** Resultado de la determinación de la relevancia de las relaciones espaciales para bosque

<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque con</i>	<i>Pruebas estadísticas realizadas</i>	<i>Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medias) P</i>	<i>Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ Dn de Kolmogorov Smirnov) P</i>	<i>Relevancia</i>
Asentamiento humano	No paramétrica	0.078339	0.002499	Muy relevante
Cultivo permanente	No paramétrica	0.920459	0.080465	Relevante
Cultivo anual	No paramétrica	0.077822	0.004958	Muy relevante
Camino	No paramétrica	0.003373	0.000094	Muy relevante
Matorral – pastizal	No paramétrica	0.693585	0.993356	No
Bosque abierto	No paramétrica	0.728258	0.952478	No

<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque con</i>	<i>Pruebas estadísticas realizadas</i>	<i>Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medianas) P</i>	<i>Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ Dn de Kolmogorov Smirnov) P</i>	<i>Relevancia</i>
Altitud	No paramétrica	0.934359	0.722234	No
Orientación de la pendiente	Paramétrica	0.39817	0.109554	Relevante*
Suelos	No paramétrica	0.645761	0.993356	No
Tenencia de la tierra	No paramétrica	0.930227	0.99723	No
Pendiente	No paramétrica	0.821076	0.728805	No

\*Este caso es muy particular y se explica más adelante por qué no se toma finalmente como relevancia dicha relación espacial.

**Tabla 3.** Resultado de la determinación de la relevancia de las relaciones espaciales para bosque abierto

<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque abierto a</i>	<i>Pruebas estadísticas realizadas</i>	<i>Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medianas) P</i>	<i>Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ Dn de Kolmogorov Smirnov) P</i>	<i>Relevancia</i>
Asentamiento humano	No paramétrica	0.028208	0.087401	Muy relevante
Cultivo permanente	No paramétrica	0.047941	0.103137	Muy Relevante
Cultivo anual	No paramétrica	0.038337	0.036631	Muy relevante
Camino	No paramétrica	0.470484	0.532016	No
Matorral - pastizal	No paramétrica	1	1	No
Bosque	No paramétrica	0.798294	1	No

<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque con</i>	<i>Pruebas estadísticas realizadas</i>	<i>Comparación de medidas de tendencia central (Medias/Medianas) P</i>	<i>Comparación de medidas de dispersión (F de Fisher/ Dn de Kolmogorov Smirnov) P</i>	<i>Relevancia</i>
Altitud	No paramétrica	0.934359	0.722234	No
Orientación de la pendiente	Paramétrica	0.39817	0.109554	Muy relevante*
Suelos	No paramétrica	0.645761	0.993356	No
Tenencia de la tierra	No paramétrica	0.930227	0.99723	No
Pendiente	No paramétrica	0.821076	0.728805	No

\*Este caso es muy particular y se explica más adelante por qué no se toma finalmente como relevancia dicha relación espacial.

### 3.2.2 Análisis de la influencia de los valores de los parámetros

El cálculo de probabilidad de pérdida de bosque y de bosque abierto se determina por medio de funciones matemáticas, ajustadas para cada parámetro relevante del modelo DEFORELATIONS. Para ello se realizó un ajuste de mínimos cuadrados, y se eligió aquella ecuación que describiera de mejor manera la distribución de los datos para la pérdida de bosque y bosque abierto. Es importante señalar que la relación espacial de coincidencia de la orientación de pendiente con bosque y bosque abierto no se consideró en la determinación de la influencia debido a que en una de las etapas del modelo se necesita el valor de Dn que se obtiene de la prueba de Kolmogorov-Smirnov, y este resulta muy dispar en comparación con las otras relaciones. Posiblemente esto se debe a que, a diferencia de las otras relaciones, la orientación de las laderas tiene valores con una distribución circular en lugar de lineal (los valores de 0 y 360 grados representan la misma orientación, debido a que el concepto de ángulo azimutal es circular) y esto requiere de otra clase de pruebas estadísticas. La Tabla 4 contiene las relaciones espaciales para bosque y bosque abierto que se consideraron como parámetros relevantes, con su respectiva ecuación. Es importante señalar que cada ecuación obtenida fue no solamente la ecuación si no también los valores de las constantes a, b y c. En el caso de la variable x se utiliza la capa raster de proximidad del bosque 2015 a cada parámetro 2015.

**Tabla 4.** Relaciones espaciales con su función de probabilidad para el caso de pérdida de bosque y bosque abierto

<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque a</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Función de probabilidad (Ecuación)</i>
Asentamiento humano	Relevante	$y^{(-1)} = a + bx^2 + \frac{c}{\ln x}$
Cultivo permanente	Relevante	$\ln y = a + bx^{1.5} + cx^{0.5}$
Cultivo anual	Muy relevante	$Y^{-1} = a + bx^2$
Caminos	Muy relevante	$\ln y = a + b^2$
<i>Relación espacial por proximidad de pérdida de bosque abierto a</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Función de probabilidad (Ecuación)</i>
Asentamiento humano	Muy relevante	$\ln y = a + b(\ln x)^2 + c \ln x / x$
Cultivo permanente	Relevante	$y = a + b \ln x + cx^3 + dx(0.5) \ln x$
Cultivo anual	Muy relevante	$y^{(-1)} = a + bx^2$

### 3.2.3 Análisis de la ponderación

Para determinar la contribución de cada relación en la pérdida forestal, se utilizan los valores de Dn obtenidos con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, y con estos valores se calcula el peso de cada parámetro del modelo. Es importante explicar que la orientación de la pendiente no se tomó como parámetro para pérdida de bosque y bosque abierto, puesto que al calcular dicha prueba de

Kolmogorov-Smirnov el valor -P (Dn) salió mayor de 0.25, esto confirma que esta relación espacial requiere de otras pruebas que consideren datos circulares. Si se incluyera en la ponderación haría que la diferencia entre los pesos de los otros parámetros y éste fuera muy grande. En la Tabla 5 y Tabla 6 se muestran dichas ponderaciones.

**Tabla 5.** Parámetros con su respectivo peso con la pérdida de bosque

<i>Municipios de estudio</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Dn</i>	<i>Peso</i>
Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro	Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque	0.229508	0.15
	Proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque	0.333333	0.22
	Proximidad de asentamientos Humanos a pérdida de bosque	0.351852	0.23
	Proximidad de caminos a pérdida de bosque	0.586207	0.39
Suma		1.5009	1

**Tabla 6.** Parámetros con su respectivo peso con la pérdida de bosque abierto

<i>Municipios de estudio</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Dn</i>	<i>Peso</i>
Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro	Proximidad de cultivo permanente a pérdida de bosque	0.22807	0.29
	Proximidad de asentamientos humanos a pérdida de bosque abierto	0.26087	0.34
	Proximidad de cultivo anual a pérdida de bosque abierto	0.285714	0.37
	Suma	0.774654	1

### 3.2.4 Análisis paramétrico

En esta fase se tomaron las funciones matemáticas anteriormente definidas para ejecutarlas en un SIG y así obtener la probabilidad de pérdida de forestal en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Esto se realizó con cada uno de los parámetros de manera individual para observar claramente cómo influye cada uno de ellos en la probabilidad de pérdida de bosque y bosque abierto. Para facilitar la interpretación de los mapas los valores resultantes se reclasificaron en rangos de probabilidad.

### 3.2.5 Probabilidad de pérdida de bosque por cada parámetro

A continuación, se muestran los resultados de cada parámetro (Figura 6) obtenidos de su respectiva ecuación, para obtener el mapa de probabilidad de pérdida de bosque por cada parámetro.

### 3.2.6 Probabilidad de pérdida de bosque abierto por cada parámetro

De igual manera que para la probabilidad de pérdida de bosque, en este caso se lleva a cabo la implementación de cada ecuación para su respectivo parámetro. Enseguida se muestra cada uno de los resultados en la Figura 7.

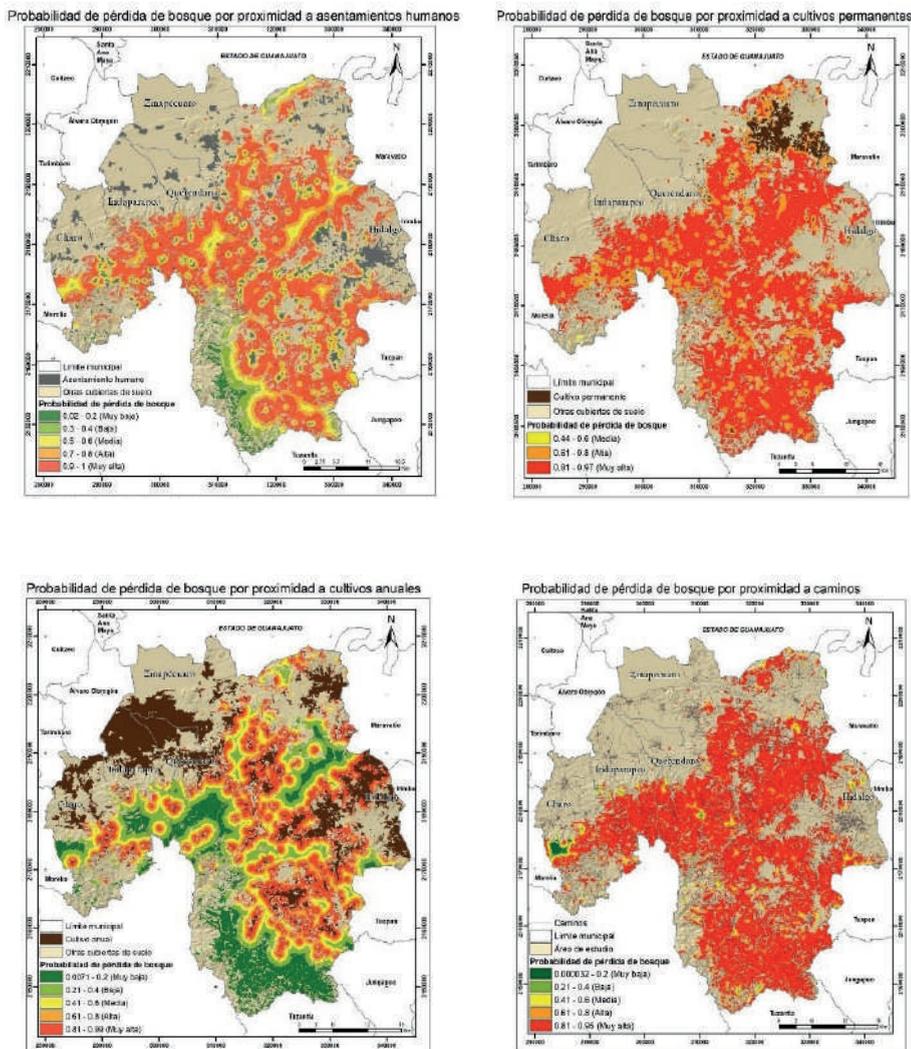


Figura 6. Probabilidad de pérdida de bosque por cada parámetro.

### 3.2.7 Análisis sintético

Para finalizar la aplicación del modelo DEFORELATIONS, se efectuó la suma, mediante combinación lineal ponderada, de todos los parámetros relevantes, pero considerando el peso de cada uno de ellos. De este modo se obtiene la probabilidad integral de pérdida de bosque y bosque abierto en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Los dos resultados obtenidos se muestran en la Figura 8.

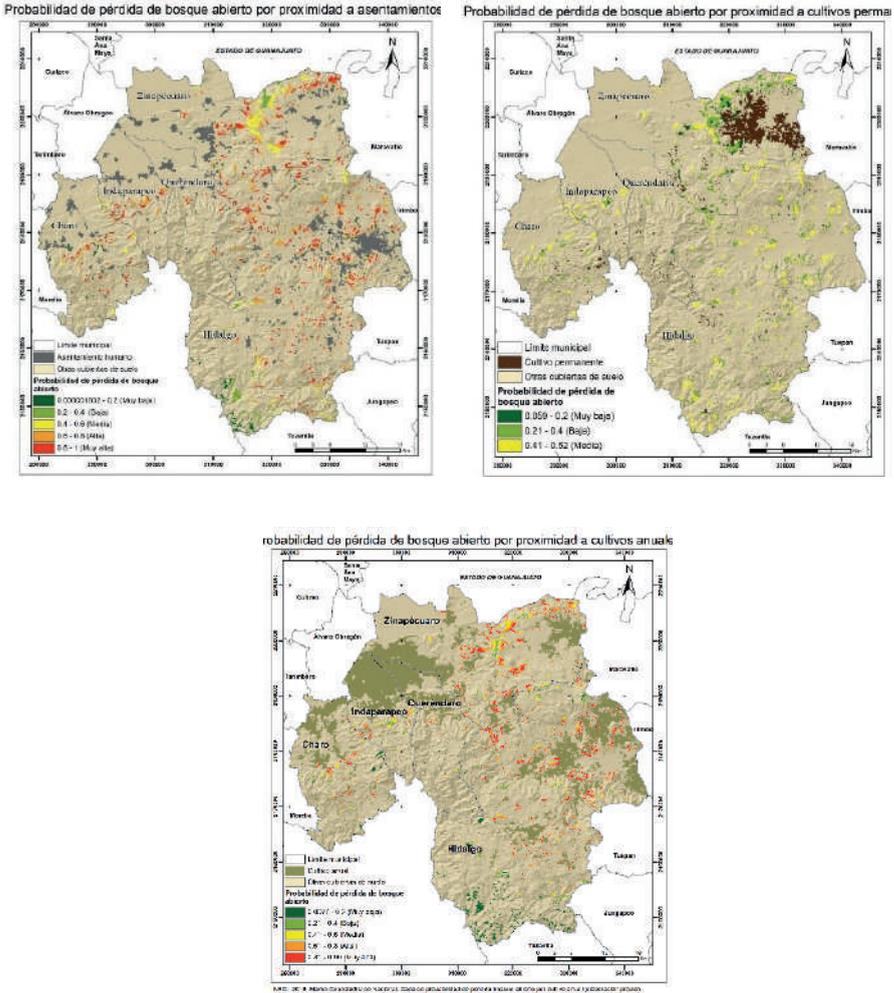
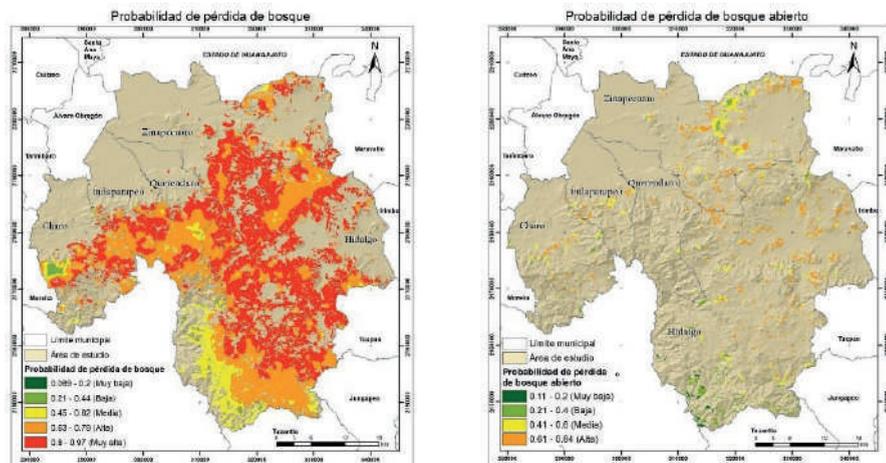


Figura 7. Probabilidad de pérdida de bosque abierto por cada parámetro.

## 4. Discusión y conclusiones

### 4.1 Cambios en la cubierta forestal en el área de estudio

En el análisis de los resultados en relación con la pérdida forestal, se identifica que, en estos años, el cambio de uso de suelo fue el principal factor que detonó la disminución del bosque, y en algunas zonas este comenzará también a ser bosque abierto. Principalmente, la ubicación de nuevos asentamientos es uno de los factores que detonan la proliferación de otros usos suelo como son los cultivos y caminos nuevos para tener accesibilidad a otras poblaciones o



**Figura 8.** Probabilidad integral de pérdida de bosque y bosque abierto.

actividades económicas. La pérdida de bosque en mayores proporciones se presenta en los municipios de Zinapécuaro e Hidalgo.

Lo que se esperaba era que la relación de proximidad de asentamientos humanos a bosque y a bosque abierto fueran el parámetro importante, ya que a medida que las poblaciones comienzan a aumentar, se expanden a lo largo del territorio o bien ocupan otros espacios y cambian los usos o cubiertas de suelo. Como segundo parámetro relevante cabría esperar la proximidad a cultivos permanentes y anuales y, como tercero, la proximidad a caminos. Pero para cada caso fue distinto, y en los resultados de la relevancia se demostró que cada clase de cubierta forestal tiene factores detonantes de pérdida diferentes a lo largo del tiempo.

#### 4.2 Resultados del análisis paramétrico

La construcción del modelo DEFORELATIONS fue uno de los objetivos logrado en este estudio y además los niveles de probabilidad de las áreas susceptibles a la pérdida forestal (Tablas 7 y 8) de cada parámetro obtenido.

En lo que respecta a la probabilidad muy alta de pérdida de bosque, la proximidad de cultivos permanentes resultó ser el factor de mayor importancia, continuando con la proximidad a los asentamientos humanos y a la proximidad de caminos. Para la probabilidad muy alta de pérdida de bosque abierto, los parámetros que contribuyen en mayor medida a esta pérdida son la proximidad a los asentamientos humanos seguidos por la proximidad a cultivo anual.

Esto arroja que las probabilidades de pérdida de bosque y bosque abierto, en ambos casos están relacionadas con la proximidad a asentamientos humanos.

**Tabla 7.** Probabilidad de pérdida de bosque

<i>Probabilidad de pérdida de bosque por proximidad a:</i>	<i>Superficie con Probabilidad alta (ha)</i>	<i>% de superficie respecto al total de bosque 2015</i>	<i>Superficie con Probabilidad muy alta (ha)</i>	<i>% de superficie respecto al total de bosque 2015</i>
Cultivo anual	17,490.9	16	30,179.79	28
Camino	40,952.91	38	56,088.82	53
Asentamiento humano	24,058.27	23	60,714.73	57
Cultivo permanente	21,121.99	20	84,620.68	79

**Tabla 8.** Probabilidad de pérdida de bosque abierto

<i>Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a:</i>	<i>Superficie con Probabilidad alta (ha)</i>	<i>% de superficie respecto al total de bosque 2015</i>	<i>Superficie con Probabilidad muy alta (ha)</i>	<i>% de superficie respecto al total de bosque 2015</i>
Asentamiento humano	2,699.11	23	4,685.66	41
Cultivo anual	2,335.84	20	4,580.75	40
<i>Probabilidad de pérdida de bosque abierto por proximidad a:</i>	<i>Superficie con probabilidad media</i>	<i>% de superficie respecto al total de bosque abierto 2015</i>		
Cultivo permanente	5,237.17	45		

### 4.3 Resultados del análisis sintético

Con este análisis del modelo DEFORELATIONS, se logra obtener otro objetivo en la investigación que es tener la probabilidad integrada de las áreas forestales susceptibles a la pérdida de bosque y bosque abierto. En la Tabla 9 se muestran los niveles de probabilidad de bosque y bosque abierto.

**Tabla 9.** Probabilidad integral de pérdida de bosque

Probabilidades	Superficie con Probabilidad alta (Has.)	% de superficie	Superficie con Probabilidad muy alta (Has.)	% de superficie
Probabilidad de pérdida de bosque	40952.9095	38.37	56089.3932	52.55
Probabilidad de pérdida de bosque abierto	5713.81618	49.58		

Se esperaría que los bosques abiertos tuvieran una pérdida con mayor grado de probabilidad que los bosques cerrados, por estar más cerca de asentamientos humanos y por estar degradados. Pero, comparando la proporción de superficie de cada una de ellas, la superficie del bosque del 2015 es de 106,733.13 hectáreas y para el bosque abierto es de 11,525.55, por lo que la pérdida de bosque será más significativa en términos de superficie.

El patrón futuro de probabilidad de pérdida forestal encontrada según el modelo sintético elaborado para esta región va a depender de que los parámetros analizados continúen también con los mismos patrones que se encuentran actualmente. Sin embargo, puede haber otros factores que no se puedan analizar en este modelo, como son las decisiones o el comportamiento de las poblaciones al momento de elegir un lugar para hacer el cambio de uso de suelo. Otro factor que quizá pueda contribuir es la existencia la ganadería extensiva o alguna otra variable que no se haya considerado para el modelo.

#### 4.4 Muestras de campo en algunas zonas para verificar resultados

En febrero del 2020 se realizó una salida con algunos puntos de verificación, solo para tener una idea aproximada de si en los últimos cinco años se tuviera algún cambio importante en la cubierta forestal no observado previamente durante el período estudiado. La toma de fotografías en los puntos de verificación se hizo con un dron. En la Figura 9 se aprecian los puntos de verificación. En el punto 1 (parte sur de Zinapécuaro) se observa la presencia de cultivos permanentes en este caso el aguacate, además de que ya se comienzan a apreciar partes con deforestación y caminos nuevos para ingresar a la zona del bosque, justamente se aprecia el patrón de que los pobladores ingresan en las partes altas del bosque sin ninguna limitante en altitud del terreno. En el punto 2, nuevamente se presenta los cultivos de aguacate y caminos y se distingue la pendiente del terreno no es una limitante para la inserción de cultivos. En la zona sur de Queréndaro (punto 3) se apreció que también cultivos de aguacate y se observa porque no hay un conocimiento de que orientación de las laderas son más favorables para los cultivos permanentes. Por último, en el punto 4 se aprecia un incendio justo para cambiar el uso del suelo en esa zona.

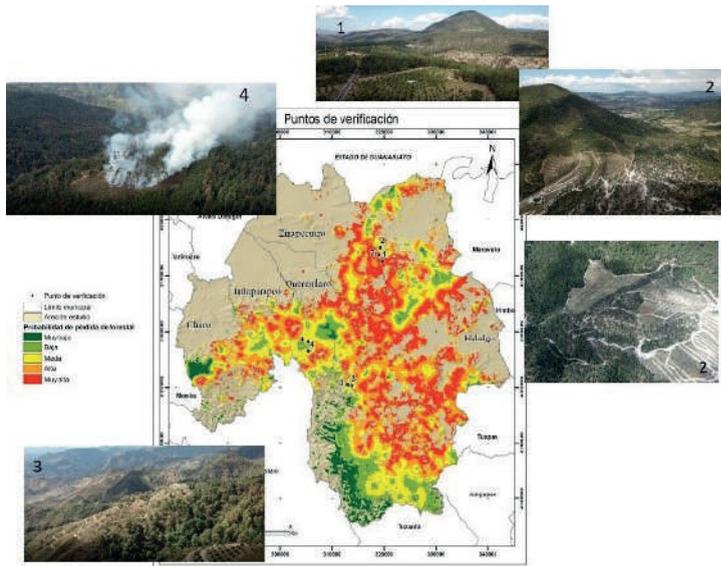


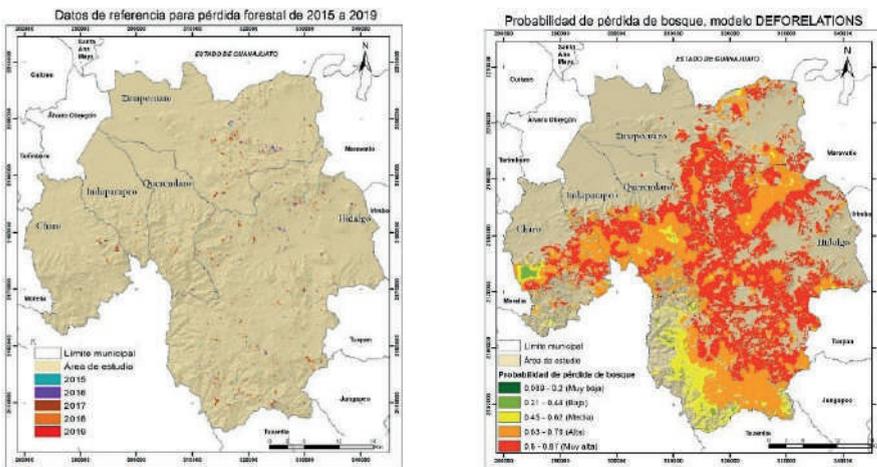
Figura 9. Puntos de verificación.

La verificación visual realizada, confirma que en el municipio de Zinapécuaro en la actualidad hay un incremento significativo de las zonas de cultivo permanente.

Con estas zonas de verificación, se comprueba que efectivamente se está presentando la pérdida forestal en los resultados de probabilidad de pérdida forestal.

#### 4.5 Evaluación del modelo sintético

En la Figura 10 se ilustra el conjunto de datos de referencia utilizado. Estos señalan las áreas de pérdida forestal para los años 2015-2019, estas zonas se obtuvieron de los datos de Hansen *et al.* (2013) del periodo del 2000 a 2019, descargando las imágenes y filtrando las fechas a utilizar para sobreponer cada año sobre la probabilidad de pérdida de pérdida de bosque del modelo sintético. Los datos están representados por celdas con resolución de 27 metros, cuyos valores indican el año de detección de la pérdida.



**Figura 10.** Resultados de la evaluación del modelo sintético.

Una primera evaluación de la fiabilidad del modelo se obtiene agregando los datos anuales 2015-2019 de pérdida forestal de Hansen para darles el valor de 1, y a continuación multiplicando esta agregación por el mapa de probabilidad sintética del modelo DEFORELATIONS, para extraer la probabilidad de pérdida para cada celda del mapa de Hansen. El total de superficie de pérdida para este período reportada por Hansen para el área de estudio es de 2,719.08 Has. A fin de facilitar la interpretación se agruparon los datos de probabilidad, así obtenidos, en las cinco clases de probabilidad de pérdida: de 0 a 0.2 probabilidad muy baja, de 0.2 a 0.4 probabilidad baja, 0.4 a 0.6 probabilidad media, 0.6 a 0.8

probabilidad alta y 0.8 a 1.0 muy alta. Estos resultados se clasificaron según las cinco clases de probabilidad de pérdida del modelo DEFORELATIONS (Tabla 10), y se calculó la superficie en hectáreas para cada clase y el porcentaje que representan cada una de ellas respecto al total de hectáreas de pérdida reportadas por Hansen para el período 2015–2019.

**Tabla 10.** Proporción de pérdida forestal según Hansen *et al.* (2013) clasificada según la probabilidad de pérdida dado por el modelo DEFORELATIONS para los años 2015-2019 tomados en forma desagregada

<i>Clase de pérdida</i>	<i>Porcentaje 2015</i>	<i>Porcentaje 2016</i>	<i>Porcentaje 2017</i>	<i>Porcentaje 2018</i>	<i>Porcentaje 2019</i>
Muy baja	0	0	0	0	0
Baja	0	0	0	0.2	0.1
Media	7.5	4.2	6	7.3	13.7
Alta	45.1	40.1	40.3	42	35.8
Muy alta	47.4	55.7	53.7	50.5	50.4
Total	100	100	100	100	100

Se confirma la capacidad y fiabilidad de predicción del modelo DEFORELATIONS, ya que, de los cinco años analizados, cuatro de ellos muestran que la probabilidad Muy Alta de pérdida de cubierta forestal es de poco más del 50% y el otro año está muy cerca de esta cifra. Asimismo, si se suman las clases de Alta y Muy Alta probabilidad, en todos los años el porcentaje de acierto en la predicción es superior al 90%, llegando hasta el 95% para el año 2016.

#### 4.6 Evaluación de los modelos paramétricos

De la misma manera en que se evaluó el modelo sintético, se realizó el mismo procedimiento utilizando las áreas de pérdida de forestal detectadas por Hansen *et al.* (2013), para los años 2015-2019, para la evaluación del modelo paramétrico en la pérdida de bosque. A continuación, se muestran los resultados de cada parámetro.

**Tabla 11.** Proporción de pérdida forestal según Hansen *et al.* (2013), clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a asentamientos humanos, para los años 2015-2019 tomados en conjunto

<i>Clase de pérdida</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy baja	43.30	2.16
Baja	131.34	6.54
Media	189.35	9.43
Alta	507.31	25.28
Muy alta	1135.56	56.58
Total (Hansen)	2006.56	100

**Tabla 12.** Proporción de pérdida forestal según Hansen *et al.* (2013) clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a cultivos permanentes, para los años 2015-2019 tomados en conjunto

<i>Clase de pérdida</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy baja	0.00	0.00
Baja	0.00	0.00
Media	0.00	0.00
Alta	49287	24.49
Muy alta	1519.68	75.51
Total (Hansen)	2012.56	100

**Tabla 13.** Proporción de pérdida forestal según Hansen *et al.* (2013) clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a cultivos anuales, para los años 2015-2019 tomados en conjunto

<i>Clase de pérdida</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy baja	521.20	25.95
Baja	268.49	13.37
Media	339.43	16.90
Alta	319.66	15.91
Muy alta	560.03	27.88
Total (Hansen)	2008.81	100

**Tabla 14.** Proporción de pérdida forestal según Hansen *et al.* (2013) clasificada según la probabilidad de pérdida por proximidad a caminos, para los años 2015-2019 tomados en conjunto

<i>Clase de pérdida</i>	<i>Hectáreas</i>	<i>Porcentaje</i>
Muy baja	0.66	0.03
Baja	6.18	0.31
Media	8.21	0.41
Alta	67.55	3.36
Muy alta	1929.53	95.89
Total (Hansen)	2012.13	100

En el caso de la fiabilidad de los modelos paramétricos, la coincidencia de la pérdida forestal de 2015 a 2019 (Hansen *et al.*, 2013) con cada una de las clases de probabilidades de pérdida de los parámetros, señalan que, espacialmente, los parámetros pueden tener una importancia ligeramente diferente a aquella indicada por la relevancia estadística. En esta validación paramétrica, los modelos resultaron nuevamente muy acertados para las clases de probabilidad Alta y

Muy Alta de pérdida forestal: la proximidad a asentamientos humanos tuvo un 81% de acierto, la proximidad a los cultivos permanentes un 94%, la proximidad a los cultivos anuales un 94% y la proximidad a los caminos un 98%. Los hallazgos de este estudio son consistentes con la validación, además que muestra que efectivamente el nivel de relevancia estadística de cada una de las relaciones coincide en la manera en que éstas pueden ser empleadas en la predicción de la pérdida forestal en esta región. Cabe destacar que la proximidad de las zonas forestales a las zonas de cultivo permanente en las pruebas estadísticas resultó un parámetro estadísticamente relevante (92% de confianza), cuando este se valida con la temporalidad de 2015 a 2019 se obtiene que efectivamente se tiene pérdida forestal en estas zonas. Por lo tanto, este parámetro resulta un mejor predictor espacial de lo que su relevancia estadística indicaba para los años 1994-2015 que se emplearon para la construcción del modelo.

#### **4.7 Aplicabilidad del modelo DFORELATIONS en otras áreas de estudio**

El modelo es por necesidad específico a cada región geográfica a estudiar, por ello en cada zona de estudio no se debe aplicar considerando las mismas variables o el mismo comportamiento de las variables. Cada variable se comporta de manera diferente dependiendo del área de estudio. Un claro ejemplo de estas diferencias al aplicar el modelo se puede apreciar en otras dos investigaciones realizadas con el modelo DFORELATIONS la de Vizcaino (2013) y Reyes (2014), ya que cada investigador elige las relaciones espaciales que considera pertinentes y que están relacionadas con la pérdida forestal en una cierta región geográfica. En el caso particular de esta investigación se tomaron más relaciones espaciales que en los otros estudios y no se realizó en dos zonas distintas, sino en la misma región, con la diferencia adicional de desagregar el modelo para dos tipos de cubierta forestal, el bosque y bosque abierto. Lo que deja a reflexionar que cuantas más relaciones espaciales se incluyan en el modelo es posible detectar más factores que están influyendo en la pérdida forestal. También, de que los insumos básicos para esta investigación en su mayoría fueron obtenidos por elaboración propia, por interpretación de imágenes de ambas fechas a escala 1:20,000, mientras que los otros estudios utilizaron cartografía existente del uso y cubierta del suelo a escala 1: 250,000. Esto último lleva a considerar que también la escala del estudio es un factor importante en la forma que se obtienen resultados del modelo.

El modelo DFORELATIONS no es un modelo único. Es necesario construir diferentes modelos para diferentes zonas geográficas y / o períodos de tiempo.

Por último, el estudio ha demostrado con éxito que el modelo DFORELATIONS para nuestra zona de estudio predice de manera sobresaliente, en la mayoría de los casos, la pérdida forestal. Esto nos lleva a concluir que los parámetros del modelo tienen una serie de implicaciones importantes para la futura práctica de la conservación del bosque y es ahí donde se podrían aplicar medidas de intervención.

## Bibliografía

- Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., ... & Townshend (2013) High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. Results from time-series analysis of Landsat images in characterizing global forest extent and change from 2000 through 2021. *Science*, 342 (6160), 850-853. <https://doi.org/10.1126/science.12488>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (1994). Ortofotos. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (2013). Estadísticas a propósito del día mundial forestal, 12 pp. <http://www.inegi.org.mx/inegi/contenidos/espanol/prensa/Contenidos/estadisticas/2013/forestal0.pdf>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (1994). Ortofotos. [https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes\(2007a\)](https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes(2007a)). Conjunto de datos vectoriales de Edafología, serie II. <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (1994). Ortofotos. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes> (2007b) Conjunto de datos vectoriales de Unidades Climáticas. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/#Descargas>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (1994). Ortofotos. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes> (2010) Conjunto de datos vectoriales de la Red Hidrográfica. <https://www.inegi.org.mx/temas/hidrografia>
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática. (1994). Ortofotos. <https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/ortoimagenes> (2013) Conjunto de datos vectoriales de Uso del Suelo y Vegetación, serie V. <https://www.inegi.org.mx/temas/usuarios>
- Mas, J. F., Bocco-Verdinelli, G., Burgos-Tornadu, A., Cuevas, G., Navarrete-Pacheco, J. A., Ramírez-Ramírez, I. & Velázquez-Montes, J. A. (2016) Proyecto de Investigación Monitoreo de la cubierta del suelo y la deforestación en el Estado de Michoacán: un análisis de cambios mediante sensores remotos a escala regional. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Morelia, Michoacán. <https://www.ciga.unam.mx/wrappers/proyectoActual/monitoreo/index.html>
- Morales Manilla, L. M., Reyes García, A., Cuevas García, G. & M. Onchi R. (2012). *Inventario 2011 del cultivo del aguacate en el estado de Michoacán*. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (UNAM)-COFUPRO, Morelia, Michoacán, 89 pp.
- Morales Manilla, L. M. (2013). Using spatial relations as parameters to explain and predict the loss of forest cover, the DEFORELATIONS model.
- Morales Manilla, L. M. (2014). *Definición de a minimum set of spatial relations* [Tesis de Doctorado en Geografía. Facultad de Filosofía y Letras, UNAM], México.
- Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (2015) Imágenes LANDSAT. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- (2018). Modelo Digital de Elevación. DEM ASTER GDEM. <https://search.earthdata.nasa.gov/search/>
- Organización de las Naciones Unidas de la Alimentación y la Agricultura (1998). *Términos y definiciones. Clasificación de la Tierra*. [http://www.fao.org/3/ae217s/ae217s02.htm#P78\\_4608](http://www.fao.org/3/ae217s/ae217s02.htm#P78_4608)
- (2016) *Evaluación de los recursos naturales 2015*. <http://www.fao.org/3/a-i4793s.pdf>

- Registro Agrario Nacional (2018). Datos geográficos perimetrales de los núcleos agrarios certificados por estado. <https://datos.gob.mx/busca/dataset/datos-geograficos-perimetrales-de-los-nucleos-agrarios-certificados-por-estado--formato-shape>
- Reyes González, A. (2014). *Análisis comparativo de los patrones espaciales de la deforestación en una zona tropical y una templada de Michoacán* [Tesis para el grado en Maestro en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México], México.
- Rosete V. F., Pérez D. J. & Bocco G. (2008). Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones Geográficas*, 67, 39-58. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112009000200004&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S0188-46112009000200004&script=sci_arttext)
- Servicio Meteorológico Nacional (2010). *Clima en México*. [http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=103&Itemid=80](http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=103&Itemid=80)
- Vizcaino, G. M. J. (2013). *Comparación de los patrones de deforestación en dos regiones de Latinoamérica*. [Tesis de Maestría para el grado de Maestra en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México], México.



# Los nuevos corredores en altura en la Ciudad de México. Análisis de su proceso, aplicación y visualización en un Sistema de Información Geográfica

The new corridors in height in Mexico-City. Analysis of its process, application and visualization in a Geographic Information System

Víctor Hugo Aquino Illescas<sup>1</sup>

*Recibido 26 de septiembre de 2022; aceptado 17 de noviembre de 2022*

## RESUMEN

El estudio de la dinámica espacial urbana genera una aproximación de gran importancia en la investigación científica, cuya finalidad es determinar la evolución de los modelos y patrones de distribución espacial en la revalorización de usos de suelo. La disposición espacial de ejes o corredores longitudinales en altura con funciones de centralidad en la Ciudad de México se ha ido conformando a través del tránsito de la estructura urbana monocéntrica de la metrópoli de mediados del siglo XX, transitado entre 1950 y 1980 por una etapa de múltiples centralidades jerarquizadas, hacia la de una trama compleja de corredores urbanos terciarios y residenciales de alto costo económico que hoy la organizan. El trabajo pretende desarrollar históricamente la configuración socio-territorial de la Ciudad de México que transita, hoy día, hacia formas multinucleares de organización, estructuración y funciones de centralidad, enmarcados por el actual auge inmobiliario en altura; para visualizar la configuración territorial se procede a la construcción de bases de datos georreferenciadas a partir de información estadística oficial y su posterior vinculación a un Sistema de Información Geografía como herramienta orientada para la gestión y creación de productos cartográficos de análisis espacial y superposición cartográfica. En este sentido, los resultados estadísticos y cartográficos permiten evaluar que la magnitud y alcance de los cambios de usos mixtos de suelo, enfocados en

<sup>1</sup> Departamento de Sociología, Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, México, correo electrónico: [vhugaillescas@xanum.uam.mx](mailto:vhugaillescas@xanum.uam.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8741-4473>.

determinar la distribución espacial de los nuevos nodos y corredores en altura, avanzan principalmente hacia la zona poniente de la ciudad, complementando en gran medida la centralidad de los corredores urbanos tradicionales.

*Palabras clave: verticalización, reestructuración urbana, análisis espacial, Sistema de Información Geográfica, Ciudad de México.*

## ABSTRACT

The study of urban spatial dynamics generates an approach of great importance in scientific research, whose purpose is to determine the evolution of models and patterns of spatial distribution in the revaluation of land uses. The spatial arrangement of longitudinal axes or corridors in height with functions of centrality in Mexico City has been shaped through the transit of the monocentric urban structure of the metropolis in the mid-20th century, transited between 1950 and 1980 through a stage of multiple hierarchical centralities, towards that of a complex web of tertiary and residential urban corridors of high economic cost that organize it today. The work aims to historically develop the socio-territorial configuration of Mexico City that is currently moving towards multi-nuclear forms of organization, structuring and functions of centrality, framed by the current high-rise real estate boom; To visualize the territorial configuration, georeferenced data-bases are built from official statistical information and their subsequent link to a Geography Information System as a tool for the management and creation of cartographic products for spatial analysis and cartographic overlay. In this sense, the statistical and cartographic results allow us to evaluate that the magnitude and scope of the changes in mixed land uses, focused on determining the spatial distribution of the new nodes and corridors in height, advance mainly towards the western area of the city, largely complementing the centrality of traditional urban corridors.

*Key words: verticalization, urban restructuring, Spatial analysis, Geographic Information System, Mexico City.*

## 1. Introducción

En la tendencia actual de los estudios urbanos, confluyen disciplinas como el urbanismo, la planificación urbana, la cartografía, la sociología, la economía, la geomática y la geografía. Cada vez intervienen un mayor número de disciplinas; el reto de explicar la complejidad del fenómeno urbano es cada vez mayor. Numerosos estudios se centran en las funcionalidades de las ciudades o en los rangos de éstas en cuestiones internacionales como el paradigma de la ciudad global, los espacios domésticos, la desigualdad social, la vulnerabilidad y los riesgos (Stevens, 2012, p. 132).

Al estudiar una ciudad y su área metropolitana se analizan un conjunto de centros de diferente tamaño, funcionalmente integrados, cuestionándose su formación, su articulación, su dinámica, su crecimiento, y su organización espacial. La expansión urbana y la complementariedad de funciones entre los centros han generado un territorio metropolitano o agrupaciones de núcleos que pueden

organizarse en distintos tipos de estructuras. Así se entendería que un área metropolitana es un centro social, económico, político y administrativo, con núcleos urbanos estrechamente relacionados entre sí, conformando una unidad funcional. Entre estos obviamente existen flujos y especializaciones de bienes y servicios, que dan forma a una organización jerárquica, donde cada núcleo tiene una función más desarrollada que el otro, generando un sistema interdependiente (Rojas *et al.*, 2009, p. 48). Algunas funciones pueden conformar áreas altamente especializadas; destacan las zonas dormitorio, distritos de negocios, comerciales y corporativos, pero todas están interrelacionadas a través de los mercados de trabajo, la vivienda y las vías de comunicación, teniendo a su vez gran capacidad para polarizar el espacio circundante.

Dentro de la historia de las transformaciones urbanas en las ciudades, en los últimos años los estudios sobre verticalización urbana han despertado un interés por abordar cuestiones sobre la forma de hacer ciudad y sus esquemas de desarrollo. Edward Glaeser (2011), uno de los autores más influyentes en el tema del modelo de las ciudades densas, expone en su libro *El triunfo de las ciudades* que la densidad y la proximidad, propios del entorno urbano, promueven la colaboración y facilitan la creatividad e innovación. Enfatiza que la densa aglomeración ha sido el motor del conocimiento, por lo que la ciudad es el lugar donde se producen nuevas ideas. En contra del desarrollo disperso altamente dependiente del automóvil, el autor sostiene que un entorno urbano denso es más ecológico y amigable con el ambiente.

De acuerdo a Herce (2013, p. 356), el principal problema con que se enfrentan las sociedades urbanas es el de la dispersión urbana heredada; grandes cantidades de población viviendo en espacios de tan poca densidad que será imposible suministrarles servicios en un contexto de creciente escasez de recursos. Ante tal desafío, la única respuesta posible es la concentración, el incremento de densidad desde un enfoque de sostenibilidad; sin embargo como resalta, es más fácil de exponer que de realizar. De tal suerte, la ciudad compacta frente a la ciudad dispersa es un debate recurrente a lo largo de la historia de las transformaciones urbanas y las estrategias para intervenir en ellas por medio de una serie de modelos, instrumentos y planes normativos. Si bien los procesos de expansión han tomado el protagonismo en la discusión actual, las formas de la ciudad compacta nunca han dejado de representar una preocupación. La edificación en altura, por ende, pone en marcha desarrollos de densificación o compactación de tejidos urbanos. La verticalización de áreas centrales es parte de una transición hacia formas más densas, con la consecuente redefinición de la situación urbana preexistente (Costa, 2000; Silva, 2004; en Fedele, 2015, p. 68).

Entre los aportes más importantes de este trabajo se incluye un análisis de los nuevos subcentros y corredores urbanos con edificación en altura como nuevos símbolos de la modernidad urbana en la Ciudad de México (CDMX). Para manifestar la transformación socioeconómica y espacial de los nuevos corredores se procedió metodológicamente a la compilación y gestión de datos estadísticos disponibles en páginas oficiales como el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), de revistas especializadas sobre mercado inmobiliario tales como CNN

Expansión (<https://expansion.mx>) y Real Estate Market ([www.realestatemarket.com.mx](http://www.realestatemarket.com.mx)), de páginas web emporis.com y edemx.com, así como de la plataforma Google Earth y herramientas de procesamiento y análisis espacial dentro de un Sistema de Información Geográfica (ArcGIS 10.4 y QGIS 2.8) para la elaboración de los productos cartográficos. El estudio abarca una vertiente multitemporal —desde 1940 hasta el 2018. Los resultados se orientan a generar información actualizada del comportamiento de proyectos inmobiliarios en altura y su ubicación geográfica dentro del área de estudio en el periodo analizado, constituyéndose en una valiosa herramienta de base para el diagnóstico territorial y la especialización socio-económica que acontece en la CDMX.

El surgimiento de los edificios en altura es una de las más importantes transformaciones de las formas territoriales del espacio metropolitano. En estas zonas predominan los usos de suelo terciarios y residenciales de alto costo económico, que dan lugar a una revalorización del espacio urbano con la proliferación de nuevos objetos urbanos, tales como centros comerciales, hipermercados, exclusivas urbanizaciones cerradas, nuevos distritos de negocios o formación de redes de distritos corporativos y localizaciones de actividades globalizadas. Uno de los principales resultados del proceso de la verticalización corporativa y residencial es el resquebrajamiento en la interacción de los diferentes grupos sociales, interacción que está determinada por la capacidad de consumo y por el interés de uso que se tenga sobre estos nuevos subcentros y corredores urbanos de marcada centralidad.

## **2. Perspectiva teórica y conceptual (marco conceptual)**

### **2.1 Modelos urbanos**

Cuando se hace referencia a estudios relacionados con la estructuración urbana se ponen en relieve los modelos urbanos. Los modelos como abstracciones de la realidad tienen una amplia tradición en Sociología, Economía y Geografía. Con diferentes modelos, teorías, técnicas y diferentes resultados varios autores como Burgess, Hoyt, Harris y Ullman, trataron de representar los principios de la estructura socioespacial de las ciudades estadounidenses. Otros estudios se difunden por el creciente desarrollo de técnicas cuantitativas, bajo la premisa de que los hechos que dan cuenta de la realidad urbana, se articulan según las reglas de la lógica matemática. Destacan el Análisis de Áreas Sociales que intenta sistematizar la realidad mediante la utilización de metodologías multivariadas y la introducción de parámetros estadísticos, y el Análisis Factorial que presupone la existencia de un factor común que explica al conjunto de variables, por lo que se centra en analizar la varianza común de cada variable; los trabajos de Shevky y Bell y Frank Sweetser entre 1960 y 1965 son ilustrativos.

Después de la segunda guerra mundial algunos autores alemanes desarrollaron modelos urbanos en diferentes regiones culturales; en 1976, geógrafos alemanes contribuyeron con modelos de ciudad latinoamericana, diferentes en detalles, pero parecidos en su representación principal (Borsdorf, 2003, p. 136). En este contexto,

bajo un enfoque de cambios en la estructura urbana, las investigaciones centraron su análisis en actividades económicas y usos de suelo. Mertins (1995) propuso la abstracción de la ciudad latinoamericana, cargada de una visión historicista del proceso de urbanización de estas ciudades, utilizando elementos como los asentamientos humanos y las estructuras de los usos de suelo urbano. Estos geógrafos alemanes propusieron una estructura antigua de anillos concéntricos (retomando a Burgess) adaptada a las ciudades latinoamericanas, con una estructura moderna sectorial, una estructura celular en la periferia. Bajo este enfoque, la estructura al interior de las ciudades latinoamericanas se interpreta como una ciudad difusa, que da pie a la creación de zonas exclusivas —fraccionamientos y zonas residenciales cerradas— asociadas a grandes centros comerciales como nuevas centralidades suburbanas de comercio y servicios (Borsdorf, 2003).<sup>2</sup>

Desde otra perspectiva, Griffin y Ford (1980) construyeron un modelo monocéntrico donde la descentralización se limitaba a un corredor comercial que partía de la zona central hacia la periferia. Si bien, el Distrito Central de Negocios (DCN) en las ciudades latinoamericanas siempre ha sido el centro económico y administrativo de la ciudad, no fue sino hasta después de la década de 1930 que entra en una nueva dinámica de funciones. El crecimiento demográfico detona la expansión de las ciudades modernas, contribuyendo a la ampliación de calles y avenidas, demolición de viejas construcciones, lotificación de predios, construcción de rascacielos de oficinas y residenciales, centros comerciales, terminales de autobuses, hoteles, restaurantes, y otras infraestructuras en los alrededores del DCN (Griffin y Ford, 1980, p. 400). Este modelo resaltaba un DCN con servicios altamente especializados y gran accesibilidad; un sector residencial para las clases media-alta y alta, y un corredor comercial para bienes y servicios, y edificios de oficinas, y por último unas zonas residenciales bien localizadas con mejores servicios urbanos; la zona intermedia de acrecentamiento *in situ*; y la zona de asentamientos marginales periféricos, con los peores o nulos servicios (*Ibid.*, p. 411).

En esta producción del espacio urbano, las transformaciones de la ciudad no sólo implican recomposición de lo ya edificado, o la expansión física territorial, sino también nuevos desarrollos en lugares nuevos o aislados. La creación de nuevas centralidades que aparecen por fuera del área tradicional de la ciudad es una tendencia. Estos puntos de concentración de provisión de servicios, superficies de oficinas y comercios son denominados *edge cities* (Garreau, 1991, en Janoschka, 2004), y entran en una dinámica de competencia de actividades económicas y funciones con el centro histórico tradicional.

Otros modelos urbanos como el desarrollado por Crowley (1995), contribuyen a la comprensión de la estructura de la ciudad latinoamericana acentuando la

<sup>2</sup> La palabra *centro* deriva del latín *centrum*, y este del griego *κέντρον* (aguijón) que es la punta del compás, el punto base para trazar la circunferencia. Su etimología se vincula con la geometría euclidiana, que considera al centro punto equidistante de todos los lados, porción concreta del espacio con una posición determinada. Con ello, además de su localización y su posición, el centro adquiere aspectos funcionales, jerárquicos y simbólicos (Paris, 2013).

relativa ausencia de control gubernamental sobre el uso del suelo y la posterior mezcla orgánica de las funciones residencial, comercial e industrial, que es característico de las ciudades mexicanas y centroamericanas (Pacione, 2005, p. 470). En función de lo anterior, se aprecia una notable descentralización de actividades económicas, con una distribución y dispersión policéntrica a partir de corredores y núcleos que favorecen un patrón de crecimiento discontinuo característico de la periurbanización (Cruz y Garza, 2014, p. 17).

Después de un mayor desarrollo en las ciudades latinoamericanas, en 1996 nuevamente Ford incorpora a su modelo de estructura urbana la división territorial de la nueva ciudad central entre el DCN y un mercado; considera la competencia y complementariedad entre nuevos nodos suburbanos, la reubicación de la industria, la importancia de las vialidades periféricas, la adición de áreas indefinidas de viviendas de clase media, normalmente situadas lo más cerca posible al sector de clases acomodadas y al periférico, y el establecimiento de la elitización residencial (gentrificación) de distritos o barrios para atraer turistas, artistas y elites locales (Ford, 1996, p. 439).

Poco después, Borsdorf (2003) modeló las dinámicas de la estructuración urbana, definiendo cuatro etapas del desarrollo de los asentamientos urbanos latinoamericanos: 1) ciudad colonial (de 1500 hasta 1820); 2) ciudad sectorial (1820 a 1920); 3) ciudad polarizada (1920 a 1970); y 4) ciudad fragmentada (desde 1970). Enfocándose uno en la actual etapa de ciudad fragmentada, los procesos económicos y de planificación urbana cambiaron a un nuevo patrón de acumulación de capital basado en el neoliberalismo, con fuerte influencia de la globalización. La flexibilización del Estado, la privatización y la desregulación permitieron a los inversores y planificadores mayores libertades. La dinámica urbana entra bajo el principio de la fragmentación, como nueva forma de separación de funciones y elementos socio-espaciales, ya no en una dimensión grande, sino en una dimensión pequeña (*Ibid.*). Por tanto, los patrones espaciales viven un proceso de fragmentación de estructura y funciones, identificándose en las ciudades nuevas áreas de actividad económica o nuevas centralidades.<sup>3</sup>

Con base en los modelos urbanos expuestos, se reflexiona que entre los muchos aspectos de la realidad urbana abordados, este interés general sobre el proceso de crecimiento demográfico, socioeconómico y físico de las ciudades tiene como preocupación central el tránsito de la ciudad compacta tradicional a la ciudad dispersa y fragmentada (Pradilla, 2015, p. 2). Actualmente, las grandes urbes como la CDMX son transformadas en su estructura urbana bajo el principio de fragmentación territorial que determina la dispersión de la infraestructura y funciones urbanas. El impulso de nuevas polaridades, nodos de actividades y nuevas centralidades con soporte en las redes de infraestructuras física, energética

3 El centro tradicional remite a las distintas jerarquías y funciones de centralidad que ese espacio ha ejercido y ejerce en relación con el conjunto de una ciudad, por lo que debe analizarse en relación con la ciudad en su totalidad. Entre las funciones de centralidad a destacarse se encuentran la simbólica que da identidad a una ciudad; la administrativa e institucional (gobierno); la de intercambio comercial, de centro de negocios (oficinas corporativas y bancarias, bolsa de valores); y la de sociabilidad urbana, entre otras (Coulomb, 2012, p. 27).

y virtual son consecuencia de este proceso, por lo que más allá de la existencia de modelos o patrones ideales normativos de ciudades en cuanto a su organización, funciones y configuración de la morfología urbana, se intenta develar sobre las contradicciones, problemas y necesidades que implica para los diversos actores y grupos sociales, el patrón específico de crecimiento seguido por cada metrópoli (Pradilla, 2011).

## **2.2 Edificación en altura y verticalización**

Este nuevo paradigma urbano, que se erige como movimiento urbano relevante de fines del siglo XX e inicios del XXI, patrocina el desarrollo de ciudades compactas con mezcla de usos de suelo, la densificación urbana, el impulso del transporte público, el fortalecimiento del concepto de hacer comunidad y el diseño orientado al peatón, con apego en cambiar los paradigmas urbanos por esquemas de ciudad más sustentables.

En este sentido, y a pesar de que se conoce que algunos procesos de renovación urbana solo atienden a intereses de las clases dominantes y de las grandes empresas (Töws y Mendes, 2011), la verticalización crea nuevas morfologías y formas de comportamiento urbano. Tal fenómeno sería el resultado de representaciones simbólicas del poder económico, estatus social, conveniencia, modernidad y como posibilidad de multiplicación del suelo urbano (Macedo, 1991, p. 68).

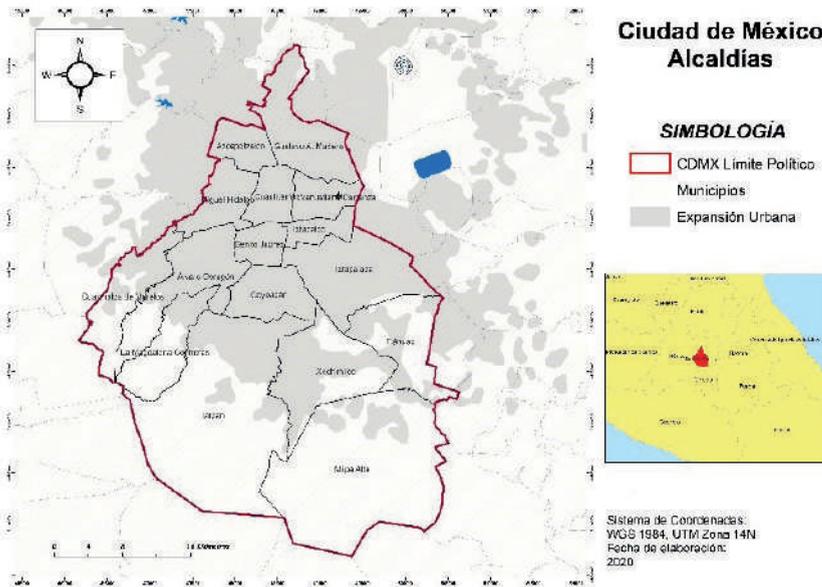
La diversidad y complejidad de intereses involucrados en la verticalización implica ir más allá de la idea de que las ciudades crecen solo porque son lugares con características de centralidad, que tienen la capacidad de aglomerar industria, comercio, empleo y vivienda o que poseen ejército de reserva. En realidad, las ciudades crecen porque hay una multiplicidad de intereses involucrados en ellas, entre los que se pueden nombrar enormes y lucrativos beneficios en la producción específica de espacios urbanos, públicos y privados (Souza, 1994, p. 246). Estos intereses son puestos en práctica por los diversos agentes que modelan y producen el espacio urbano. De esta forma, el espacio urbano ha sido producido y reproducido, gestionado por los agentes modeladores para reproducir las estructuras de poder y dominación en la sociedad, dando lugar a normas de comportamiento e imposición de formas de vida (Mendes, 2009, p. 20).

Este proceso de verticalización presente en las principales metrópolis del mundo, se relaciona igualmente con la cultura del consumo. Los aspectos verticales de la producción, experiencia y representación del espacio urbano son claramente fundamentales a la naturaleza de las ciudades actuales (Hewitt y Graham, 2015, p. 924), por lo que el proceso de verticalización urbana se materializa por medio del edificio. De acuerdo a lo planteado, Souza (1994, p. 247) entiende que el espacio es sobrevalorado por la instalación de edificios, ya que el proceso de verticalización va más allá de la construcción del edificio, tiene la capacidad de reproducir los diferentes tipos de capital. Sintetizado en la producción del edificio, la verticalización, indudablemente, conlleva estrategias complejas del proceso de producción capitalista en su dimensión más amplia.

Por su parte Ramires (1998, p. 98) resalta que la verticalización del espacio urbano representa una revolución en la forma de construir, que afecta la dinámica de acumulación y reproducción del capital en el sector de la construcción y el mercado inmobiliario. Por lo tanto, es posible a través de este capital producir diversos cambios en las formas y funciones del paisaje urbano en la ciudad con el mecanismo de la multiplicación del suelo vía revalorización del espacio urbano como resultado del aumento del potencial de aprovechamiento o uso de suelo.

### 3. Descripción del área de estudio

La CDMX (antes Distrito Federal, DF) es la entidad más pequeña del país con una extensión de mil 485 km<sup>2</sup>. Está integrada por dieciséis demarcaciones territoriales (alcaldías, antes delegaciones). Se constituye en el centro de mayor concentración de población a nivel nacional, con nueve millones 209 mil 944 habitantes (INEGI, 2020). Es uno de los centros económicos más importantes de Latinoamérica y a nivel nacional es el principal centro político, económico, social, académico, financiero, empresarial, turístico, cultural, de comunicaciones y entretenimiento. El área de estudio (Figura 1) de la presente investigación corresponde al perímetro administrativo de dieciséis alcaldías; éstas presentan diferencias graduales en cuanto al impacto generado por las profundas mutaciones en la estructura económica y la tendencia a la modernización arquitectónica y urbanística de diversas zonas de la ciudad.



**Figura 1.** Ciudad de México (DF); alcaldías (delegaciones).

Fuente: elaboración propia.

## **4. Consideraciones metodológicas**

Este trabajo consideró el análisis espacial desde un enfoque geográfico, por lo que reconoce la localización relativa por arreglos o relaciones entre los objetos en el espacio, la localización absoluta o geométrica en relación con las coordenadas geográficas de los objetos, así como de las relaciones del tipo de adyacencia, continuidad y contigüidad; en este sentido, el análisis espacial es un amplio conjunto de procedimientos de estudio de los datos geográficos, en los que se consideran sus características espaciales; destacan la localización y los atributos de los objetos como componentes del dato espacial (Stevens, 2012, p. 136).

La metodología cualitativa y cuantitativa implementada, como aspecto concreto en el diseño de esta investigación, contó con las siguientes fases:

### **4.1. Revisión bibliográfica**

Esta fase estuvo enfocada en un tratamiento de tipo cualitativo con base en búsqueda bibliográfica de fuentes primarias y secundarias que implicaron recabar literatura sobre los conceptos de centralidad y verticalización que justificaron el modelo de ciudad latinoamericana que busca nuevos nichos de mercado dentro de la metrópolis neoliberal, así como de literatura relacionada con el tema y documentos en línea. De igual manera, se realizó una revisión bibliográfica exhaustiva sobre investigaciones geográficas que han contribuido, con argumentos teóricos, al análisis de procesos de edificación en altura a nivel mundial, así como dentro del ámbito latinoamericano.

### **4.2. Consulta e identificación de información para la construcción de bases de datos y diagnósticos**

Esta fase incluyó la consulta de mapas y cartas antiguas de la CDMX a diferentes escalas cartográficas disponibles y facilitadas por la Mapoteca Orozco y Berra. Se realizó una búsqueda de información hemerográfica en revistas especializadas sobre mercado inmobiliario que resaltara construcciones en altura y notas periodísticas puntuales —CNN-Expansión ([expansion.mx](http://expansion.mx)), Real Estate Market ([www.realestatemarket.com.mx](http://www.realestatemarket.com.mx)), CBRE México ([www.cbre.com.mx](http://www.cbre.com.mx)), Avison Young Mexico City ([www.avisonyoung.mx/web/mexico-city](http://www.avisonyoung.mx/web/mexico-city))— y respecto a la di-námica del comportamiento inmobiliario del sector vivienda se consultó la página electrónica metros cúbicos, sitio web especializado en oferta de vivienda (<https://www.metroscubicos.com/>). Asimismo, se examinaron los marcos normativos y decretos de los programas de desarrollo urbano de la CDMX de la Secretaría de Desarrollo Urbano y Vivienda SEDUVI.

### **4.3. Elaboración, análisis de bases de datos y productos cartográficos**

Esta etapa abarcó la elaboración de gráficas, mapas y material cartográfico con la información recabada en la fase ii. Los datos que se utilizaron para construir

las bases de datos sobre los principales proyectos históricos en altura en la CDMX fueron: fecha de realización, número de niveles, altura en metros, giros económicos, comerciales, usos de suelo y dirección (ubicación geográfica); la información procede principalmente de las páginas web emporis.com y edemx.com, y se complementó con verificaciones en campo.

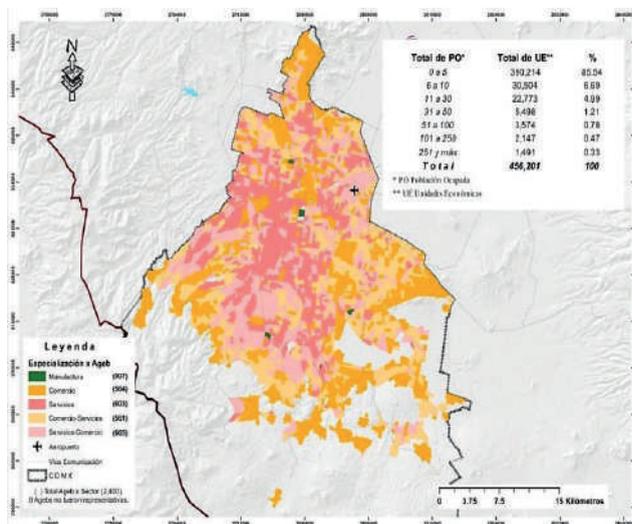
Tarea obligada era que cada uno de estos proyectos inmobiliarios (más de mil doscientos puntos) contara con la ubicación geográfica (georreferenciación) correspondiente como atributo con el fin de evaluar su localización e identificar a qué submercado correspondía; la plataforma Google Earth fue una herramienta tecnológica de gran utilidad para lograr este cometido. La elaboración de cuadros y gráficas para explicitar el comportamiento de subsectores terciarios de la economía, las Unidades Económicas (UE) y de la composición de la estructura sociodemográfica fue con base en información de índole demográfica y económica derivada del Instituto Nacional de Estadística y Geografía INEGI (INEGI.org.mx y el directorio de establecimientos DENUÉ (<https://inegi.org.mx/app/mapa/denué/>), institución encargada de la elaboración de los censos nacionales (1990, 2000 y 2010). Los softwares implementados para la sistematización (tratamiento, gestión y tabulación) de todos los datos recabados, conformados en bases de datos y las bases cartográficas para su posterior representación en mapas (proporcionadas por el INEGI), fueron las plataformas SIG de ArcGIS 10.4 de ESRI y QGIS 2.8.

## 5. Resultados

### 5.1 Reestructuración económica y manifestación espacial en la Ciudad de México

Una vez que se lleva a cabo la notable desindustrialización en la CDMX y se pone en marcha el modelo de acumulación capitalista neoliberal (aproximadamente en 1982 en el país), por ende, trajo como consecuencias la terciarización de su estructura económica y el auge de los sectores comerciales, de servicios financieros, seguros, bienes inmuebles, restaurantes, hoteles, la mejora en comunicaciones —selectiva en ciertos espacios en la ciudad, destacando las tecnologías virtuales de información (TIC)—, transporte y corporativos. La Figura 2 pone de relieve la distribución, localización y especialización de actividades manufactureras, comerciales y de servicios en la CDMX en 2017 de Unidades Económicas (UE) a nivel AGEB.<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Se utilizó la información de Unidades Económicas (UE) del Denué-INEGI al 2017 a nivel de Áreas Geoes-tadísticas Básicas Urbanas (AGEBS), que fungieron como unidades pequeñas de análisis. Este mapa consideró la especialización por AGEB para la CDMX —dos mil 408 AGEBS urbanas y un total de 456 mil 201 UE que representaron los sectores manufacturas, comercio y servicios— de acuerdo a la concentración de las UE por los tres sectores económicos dentro de cada AGEB. Se identificaron patrones de especialización



**Figura 2.** UE por sectores y especialización económica en CDMX, por AGEB, 2017.  
Fuente: elaboración propia con base en el Denue-INEGI, 2017.

Esta tendencia hacia la terciarización se explica por procesos de subcontratación de funciones complementarias o no sustantivas de las empresas. Lo que fueron departamentos de contabilidad, mercadotecnia, legal, etc., tienden a ser eliminados o reducidos para dar paso a la subcontratación de firmas especializadas en este tipo de servicios, lo que permite reducir costos de operación y aprovechar empresas especializadas en el servicio, conjunto de empresas que se clasifican como servicios al productor por ofrecer su servicio a otras firmas. Por ejemplo, en 2003 la CDMX registró una aglomeración muy alta de los servicios al productor que explicó el 76,4% del valor agregado nacional, correspondiendo al entonces DF una concentración del 75%. Desagregada ésta a nivel alcaldía (delegación), solo tres concentraron el 55,6% de ese valor agregado nacional, a saber, Cuauhtémoc, Miguel Hidalgo y Benito Juárez. Para 2014, la Zona Metropolitana (incluida CDMX como conjunto) registró una concentración del 30%, el DF (CDMX) 85,5%, siendo las alcaldías (delegaciones) Miguel Hidalgo (21,2), Cuauhtémoc (27,9) y Benito Juárez (13,2), las que concentraron una alta gama de servicios al productor con un 62,3% en conjunto (véase Tabla 1).

de servicios, comercio y mixto al centro, sur y poniente, en corredores urbanos; las manufacturas se localizaron en puntos muy acotados al norte, centro, sur y oriente. En todos los casos, las UE que rebasaban el 50 por ciento en el sector económico en el que fueron codificados se las clasificó como especialización predominante. A las UE que se las clasificó como de especialización mixta, presentaban más del 45 por ciento en el sector dominante, y más del 35 por ciento para el segundo sector.

**Tabla 1.** Servicios al productor y su valor agregado con respecto al porcentaje de la producción nacional en 2003 y 2014

	<i>Servicios</i>									
	<i>Al productor</i>		<i>Financieros y seguros</i>		<i>Inmobiliarios</i>		<i>Profesionales, científicos y técnicos</i>		<i>Dirección de corporativos y empresas</i>	
	2003	2014	2003	2014	2003	2014	2003	2014	2003	2014
<b>Cd. México**</b>	76.4	30.0	87.7	81.6	32.5	29.6	50.1	49.1	80.6	63.5
<b>Distrito Federal DF</b>	75.0	85.5	87.2	99.3	26.4	79.0	46.4	92.8	79.7	99.7
<b>Delegaciones</b>										
Benito Juárez	8.5	13.2	11.2	22.8	3.1	12.0	7.3	20.4	0.3	23.4
Cuauhtémoc	29.6	27.9	44.0	27.2	3.7	11.9	8.0	16.3	0.3	0.6
Miguel Hidalgo	17.5	21.2	8.9	12.7	7.3	29.9	18.5	41.4	66.2	43.1
Resto	44.4	37.6	35.9	37.2	85.9	46.2	66.2	21.8	33.2	32.9
% total DF	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

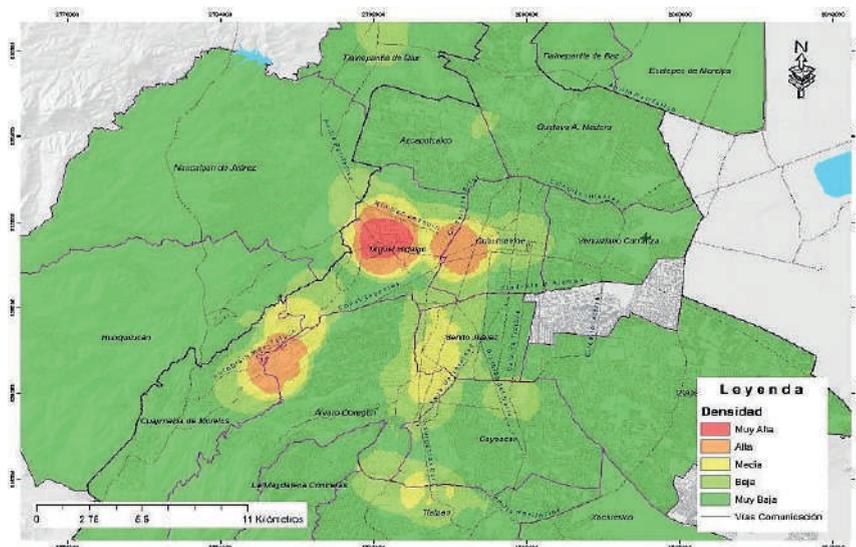
**Fuente:** elaboración propia con datos del Censo Económico de INEGI y Parnreiter, 2003.

\*\* Se considera a la CDMX como ZMCM para el cálculo de variables Servicios al Productor.

Asimismo, la concentración de las casas matrices de las 500 empresas más grandes registradas en México continúa siendo muy significativa. El número de empresas grandes que poseen sus principales sedes en la CDMX se ha mantenido por encima del 90% desde el reporte del año 2006. En 1993, 256 de las 500 empresas más grandes tenían sus sedes principales en la ciudad. Trece años más tarde totalizaron 352 —un aumento de 37 %—. Veintidós años después se registran 330, lo que favorece la concentración de casas matrices en un 93,6% en la CDMX (DF).

Esta situación permite recalcar que la CDMX es sede de las principales empresas matrices nacionales e internacionales. Tan solo de las 500 empresas más grandes en el país en 2015, 330 (66% del total nacional) se localizaron en la ciudad; 174 fueron nacionales (52,7%) y 156 extranjeras (47,3%). Por ende, esta concentración de empresas (Figura 3) aumenta la conexión de inmensos flujos de mercancías y personas en relación al territorio local, metropolitano, nacional e internacional.

La localización de los servicios avanzados de la ciudad se desarrolla hacia el poniente. Mientras que algunas alcaldías (delegaciones) centrales como Cuauhtémoc —centro histórico y una parte del Paseo de la Reforma—, y Azcapotzalco, al norte de la ciudad —de antaño industrial— van perdiendo importancia, Miguel Hidalgo, y en particular Álvaro Obregón y Cuajimalpa, al poniente de la ciudad, van atrayendo numerosas sedes de firmas. Ante estos hechos, del total de las 500 empresas en enero de 2018, 271 eran de propiedad mexicana (54,2%), y 229 de capital extranjero —Estados Unidos (97), Alemania (15), y España (15) como las de mayor número; destacando los sectores servicios financieros (10,2%), telecomunicaciones (7,6 %) y comercio exterior (7,2%)— (Expansión, 2018).



**Figura 3.** Concentración de las principales empresas en la CDMX, 2015.

Fuente: elaboración propia con información de CNN Expansion.

De acuerdo a este panorama, la incorporación de la CDMX, como bisagra entre la producción nacional y el mercado mundial, se debió por su rol atractor de actividades económicas que son necesarias para el funcionamiento de mercados globales, el consecuente aumento de su economía interna, sus funciones de control, gestión, concentración y articulación global de los servicios al productor (Sassen, 2001, en Parrreiter, 2011, p. 7). En las últimas dos décadas la estructura urbana de la CDMX se ha caracterizado por una estructura más policéntrica, por lo que es posible asumir una multiplicación de nuevos espacios de centralidad urbana, y varios de ellos se manifiestan tanto en subcentros como en corredores urbanos los cuales destacan por su edificación en altura y su especialización. Las nuevas necesidades de la producción exigen infraestructuras especializadas que respondan a los elevados niveles de competitividad requeridos por la economía globalizada. El Estado como agente económico que regula la actividad inmobiliaria a través de normas, que incide en el mercado y usos de suelo, invierte para viabilizar el capital acumulado, y crea espacios funcionales dentro de sus perímetros administrativos que, en conjunto con las acciones de empresas privadas del sector inmobiliario, van dando un nuevo sesgo metropolitano a la ciudad.

Los desarrollos corporativos han sido claves para la expansión del sector terciario, y generalmente implican cambios significativos en los usos y valores del suelo. Y pese a que la accesibilidad a ciertas localizaciones centrales sigue siendo muy importante, el alcance de estos nodos se ha ampliado; existe una difusión espacial de actividades que buscan localizaciones centrales, entre diferentes polos de desarrollo alternativos a pesar de mantener patrones de concentración.

## 5.2 Especialización de nuevos subcentros y corredores urbanos en altura

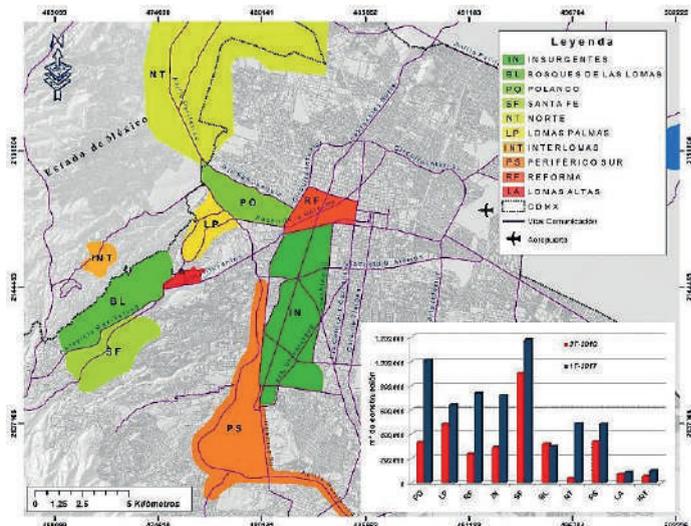
Desde que se firmó el Tratado de Libre Comercio de América del Norte (TLCAN) en 1994, el auge inmobiliario de oficinas en la CDMX prácticamente inició. Las nuevas funciones de la CDMX como ciudad global permitieron el crecimiento de la demanda de espacio de oficinas para empresas transnacionales y mexicanas que operan a nivel internacional. A finales de 1999 se disponía de un inventario de oficinas ligeramente mayor a cuatro millones de m<sup>2</sup> (Cevallos, 2000). En este rubro, la consultora inmobiliaria internacional Colliers-Lomelin informaba que para satisfacer la demanda de espacio para oficinas corporativas, la actividad inmobiliaria se concentraba en siete principales submercados, mismos que se localizaban al poniente de la ciudad: Reforma, Polanco, Lomas, Bosques de las Lomas, Santa Fe, Periférico Sur e Insurgentes.

Entre 1997 y 2011 el inventario total del espacio de oficinas creció en 3,7 millones de m<sup>2</sup>. A mediados de 2012, el inventario total de oficinas corporativas en la CDMX fue de 6,5 millones de m<sup>2</sup>, incluyendo los tipos de oficinas A+, A y B. Los edificios de oficinas A+ son los más nuevos, lujosos, con avances tecnológicos en construcción y magnífica ubicación; los tipo A tienen entre 11 y 20 años; y los tipo B tienen entre 21 y 25 años. En términos de demanda y expansión, gran parte de la producción se concentró en los submercados de Reforma, Polanco e Insurgentes. Los precios promedio rondaron los US\$27/m<sup>2</sup>/mes en la mayor parte de la ciudad. La mayor disponibilidad de oficinas se concentraba en Reforma e Insurgentes, corredores históricos tradicionales, y se preveía una producción entre 2013 y 2014 de aproximadamente 400 mil m<sup>2</sup> (Jones Lang Lasalle, 2012, p. 22).

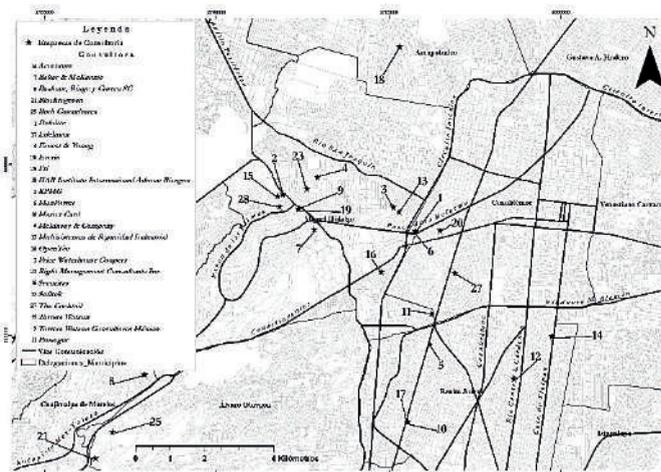
Durante 2013, la oferta inmobiliaria en el segmento de oficinas creció 4,5 %, lo que favoreció la incorporación de tres nuevos espacios para totalizar diez corredores: Interlomas, Lomas Altas (ambas al poniente de la ciudad) y norte (Periférico norte; véase la Figura 4). Al cierre del año la disponibilidad era del 11%, siendo la zona de Lomas Altas la más dinámica, al incrementar en 33% su oferta inmobiliaria, seguida de Periférico Sur, con 20%, Insurgentes, con 16,7% y Santa Fe, con 10%.

En el primer semestre de 2017, el sector de oficinas de clase A+ y A tuvo un inventario de 5,7 millones de m<sup>2</sup>. Distribuidos por número de edificios entre los diez corredores citados: Reforma con 21 (12,84 %); Polanco, 43 (17,57); Lomas, 64 (11,19); Bosques, 17 (5,21); Santa Fe, 75 (20,48); Periférico Sur, 33 (8,44); Insurgentes, 47 (12,52); Interlomas, 12 (1,74); Lomas Altas, 7 (1,49); y Norte, 25 (8,52; [avisonyoung.com](http://avisonyoung.com)). La gráfica al interior de la Figura 4 muestra que un poco más de la mitad de este tipo de oficinas se ubican en Santa Fe, Polanco y Paseo de la Reforma. Insurgentes y Lomas también se conciben como espacios para empresas integradas en los mercados globales.

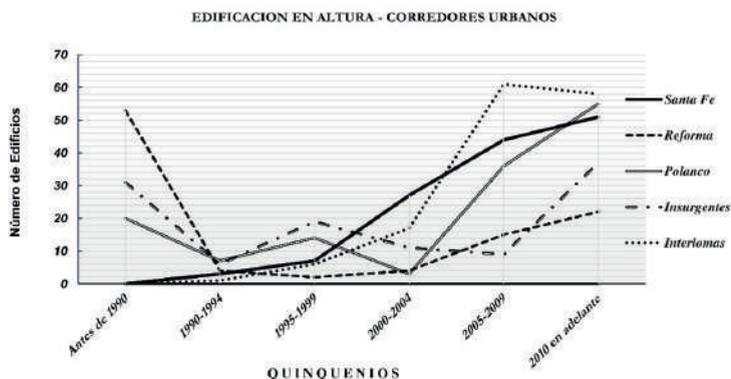
La marcada concentración e incremento del sector financiero nacional en la CDMX revela que las antiguas plazas financieras de Reforma e Insurgentes (centro tradicional) son insuficientes, y la demanda de nuevos espacios se ha ido expandiendo hacia el poniente de la ciudad, ubicándose en corredores urbanos muy valorizados de arquitectura vanguardista; con buena conectividad, así como infraestructura, servicios y otras funciones que genera la aglomeración (Vázquez y Fuentes, 2015, p. 102).



De esta forma, la CDMX acoge las oficinas de las grandes empresas transnacionales de consultoría entre las que se destacan Deloitte & Touche, KPMG, Price Waterhouse Coopers, Accenture (antes Andersen Consulting) y Ernst & Young (grupo conocido como Big Five). Sobresalen otras empresas que asesoran inversionistas, desarrolladores inmobiliarios y servicios financieros como Cushman & Wakefield, Softec, Colliers International, Lang LaSalle, y CBRE (remítase a la Figura 5).



Particularizando sobre la dinámica temporal de los corredores en altura y las nuevas centralidades, su estructura y uso de suelo, en primer lugar existe un desplazamiento de los ejes de verticalización corporativa de zonas centrales hacia el poniente de la ciudad, que posee mejor infraestructura, servicios y equipamiento urbano, así como mejores condiciones ambientales y suelos más estables geológicamente hablando. Los datos recabados y su posterior georreferenciación dentro de las herramientas SIG muestran cómo la construcción de edificios altos en estos corredores ha tenido marcados periodos de auge (Figura 6). A mediados de los años 1990 se aprecia un importante incremento en el número de edificios, sobre todo en el corredor Insurgentes y el corredor Santa Fe; otro periodo de auge es más marcado, porque en algunos corredores se produce un boom de edificios en altura, como es el caso de, nuevamente, el de Santa Fe y el de Interlomas, y posteriormente Polanco. A grandes rasgos, antes de los años 1990, los primeros y tradicionales ejes de la verticalización eran Reforma en la zona central, e Insurgentes con el mayor número de edificios altos; veinte años después se lleva a cabo una reactivación importante y los nuevos ejes de la verticalización se desplazan al poniente de la ciudad con Interlomas y Santa Fe, y Polanco en la parte más central, complementando en gran medida a los ejes anteriores que aún se mantienen activos.



**Figura 6.** Construcción de edificios altos por corredores urbanos en CDMX, 1990-2010.

**Fuente:** Elaboración propia con base en [emporis.com](http://emporis.com) y [edemx.com](http://edemx.com)

En cuanto a la especialización de los ejes de la verticalización como nuevas centralidades, los usos de suelo residenciales y de oficinas corporativas son los predominantes en la construcción en altura en la gran mayoría de ellos (véase la Tabla 2). En los corredores, estos dos usos representan más del 80%; sin embargo, una excepción es el corredor Reforma que en segundo lugar posee el uso de hoteles, condición que resalta por su localización central. De vivienda residencial de altos ingresos a uno de los principales ejes articuladores lineales de la metropolización hacia el poniente de la ciudad, Paseo de la Reforma se terciariza e incrementa el uso intensivo del suelo (Figura 7). A partir del Centro Histórico, esta centralidad ampliada conecta áreas corporativas y residenciales de sectores de altos ingresos como

Santa Fe (véase figura 8), Lomas de Chapultepec y Polanco (Figura 9), por lo que la morfología, el simbolismo y apropiación clasista del paseo es notoria.

**Tabla 2. Usos de suelo por corredores urbanos**

Corredor Urbano	Distribución de Edificios y Principales Giros								Total
	Comercio	Educativo	Hospital	Hotel	Oficinas	Residencial	Mixto*	Otros**	
Polanco (PO)	1	—	—	6	61	115	14	1	198
Lomas Palmas (LP)	—	—	—	1	17	15	2	—	35
Reforma (RF)	—	—	—	34	75	23	10	2	144
Insurgentes (IN)	—	1	2	1	76	81	17	—	178
Santa Fe (SF)	—	—	—	6	32	82	12	—	132
Bosques de las Lomas (BL)	—	—	—	—	19	83	4	—	106
Periférico Norte (NT)	—	—	—	—	3	5	6	—	14
Periférico Sur (PS)	—	1	4	4	34	61	4	—	108
Lomas Altas (LA)	—	—	—	—	2	—	—	—	2
Interlomas - Huixquilucan (INT)	—	—	—	—	2	164	3	—	169
Otros	—	1	5	—	24	83	5	1	119

Muestra de Edificios = 1205

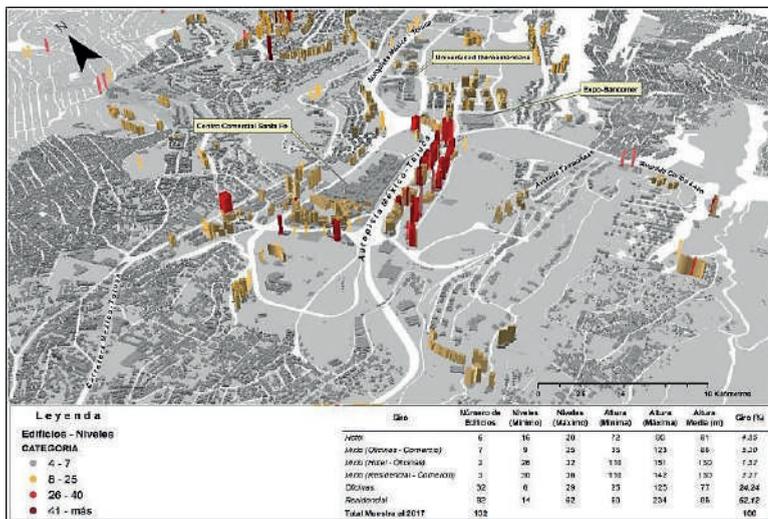
**Fuente:** elaboración propia con datos de CBRE.com.mx, Avison Young Mexico-City, y emporis.com.

Los corredores muestran cierta especialización según uso de suelo y altura. En Polanco, Insurgentes e Interlomas-Huixquilucan se presentan la mayor densidad de edificios respectivamente (198, 168 y 169); Reforma y Santa Fe les siguen en importancia (144 y 132). Sin embargo, el corredor Reforma contiene el mayor número de edificios mayores a 200 m; este corredor se ha vuelto emblemático a lo largo de la principal avenida de la zona central. En cuanto al uso de suelo, Interlomas-Huixquilucan y Santa Fe están claramente especializados en uso residencial (97 y 62% respectivamente). En el otro extremo, el corredor Reforma, que solo dedica el 16% al uso residencial, está más especializado en usos de suelo terciario como oficinas y hoteles. Es de destacar que otros usos como los comerciales, financieros u hospitales, no son tan frecuentes en la construcción en altura, ni aun mezclados con otros usos.

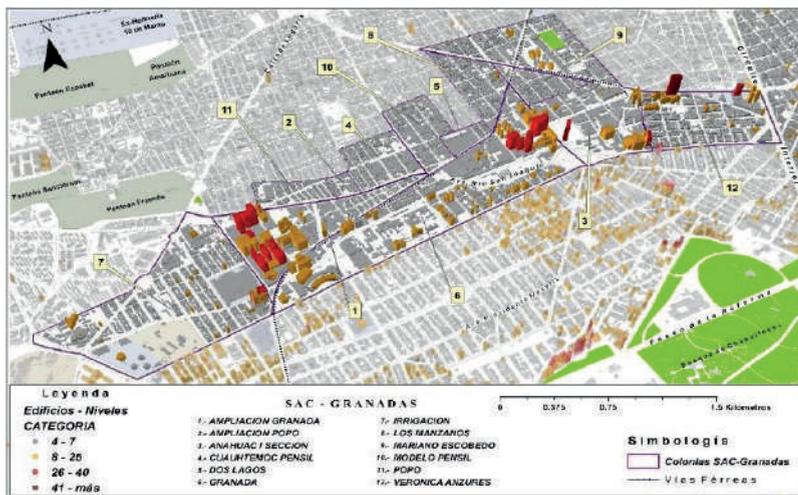


**Figura 7.** Corredor urbano en altura, Paseo de la Reforma-Alameda.

Fuente: elaboración propia, plataforma 3D ArcGIS 10.4.

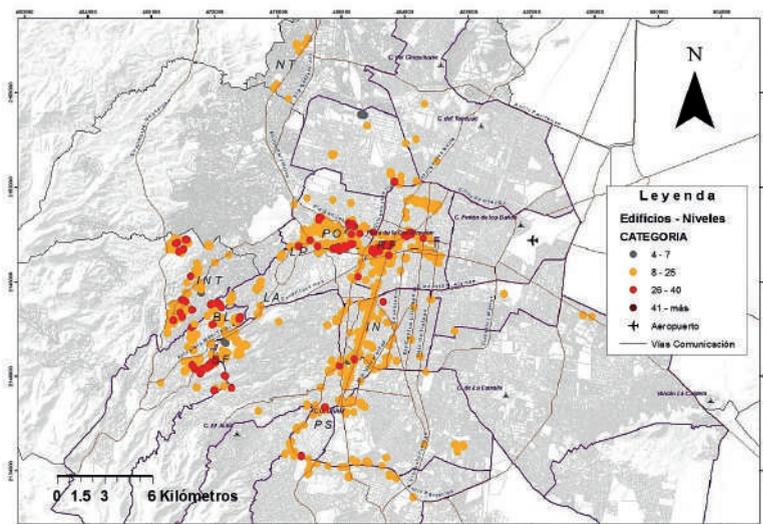


**Figura 8.** Corredor urbano en altura, Santa Fe.  
Fuente: Elaboración propia, plataforma 3D ArcGIS 10.4.



**Figura 9.** Corredor urbano en altura, Polanco-Nuevo Polanco (las Granadas).  
Fuente: elaboración propia, plataforma 3D ArcGIS 10.4.

Actualmente, Santa Fe, Reforma, Polanco y otros corredores urbanos en altura, como nuevas centralidades, aparecen como ámbitos de la reproducción urbana de la CDMX en la mundialización neoliberal. Su materialización y gestión es posible gracias a la combinación de capitales inmobiliarios y financieros nacionales e internacionales (véase Figura 10).



**Figura 10.** Distribución de edificios por niveles y giros por corredor urbano.

Fuente: elaboración propia con información de skyscrapercity, empo-ris.com y edemx.com.

En este orden de ideas, si se habla de la CDMX como ciudad global se habla, por ende, de algunas zonas bien delimitables espacialmente (Parnreiter, 2016, p. 156). En consecuencia, es importante destacar que esta geografía de la accesibilidad condiciona las estrategias de localización —o de relocalización— de las funciones urbanas. De esta forma, la actual política urbana neoliberal concede a las empresas constructoras ser artífices de la actividad productiva para el funcionamiento del mercado inmobiliario de oficinas, así como el residencial y mixto en altura. El rol que protagoniza el Estado, por tanto, consiste en garantizar un ambiente urbano óptimo para el desenvolvimiento de las empresas privadas.

## 6. Consideraciones finales

Desde un enfoque teórico, técnico de análisis espacial y de visualización en un Sistema de Información Geográfico (SIG), esta reconfiguración de espacios por la que atraviesa la CDMX fue representada visualmente gracias a la implementación de herramientas de geotecnología como Google Earth. Con sus potencialidades y limitantes, Google Earth fue un instrumento técnico de gran importancia para este estudio al facilitar la creación y tratamiento de datos georreferenciados que permitieron la exploración, el análisis, la comprensión y la comunicación de información dentro de un espacio virtual. Los aspectos relacionados con la localización y la extensión espacial de los datos gestionados a partir de esta plataforma web cobraron relevancia al combinarse con herramientas de geoprocetamiento en SIG. Como atributos básicos de la base de datos de los edificios, se destacaron la fecha de realización (proceso),

número de niveles, alturas en metros, giros económicos y usos de suelo (especialización); la ubicación geográfica fue primordial para georreferenciar y evaluar la localización de cada edificio.

Con las herramientas de geoprocésamiento en SIG fue posible dibujar el comportamiento espacial, la dinámica y la ubicación geográfica de los edificios, incluso los más icónicos (altos); esta evolución espacial presenta patrones longitudinales de especialización y mezcla de actividades económicas de localización que facilitan la interpretación de la interrelación entre los diferentes subcentros y nodos urbanos que la integran. Este tipo de geotecnologías amplían las posibilidades de obtener resultados asociados a la transformación urbana y su modelización por cambios de usos de suelo incorporados a la escala de la producción inmobiliaria en altura.

Los resultados a partir de los mapas y la cartografía generada exponen la tendencia del alcance urbano de subcentros y corredores especializados, sobre todo los de corte corporativo y residencial, como imagen del proceso de estructuración urbana de la CDMX en las últimas décadas. Esta evolución espacial reciente en la ciudad evidencia la dinámica de la ocupación del suelo urbano mediante la incorporación del edificio en altura. La dimensión temporal del proceso de verticalización en la CDMX revela, en términos espaciales, la estructura policéntrica que representa un fuerte sesgo hacia el desarrollo de zonas residenciales de élite, principalmente hacia el poniente y sur de la ciudad, mismas que son áreas con mejor infraestructura y grupos con mayor poder económico en la ciudad.

La centralidad pierde relevancia en favor de una mayor flexibilidad en los patrones de localización, como consecuencia de la incorporación de negocios internacionales, el desarrollo de sistemas de transporte y telecomunicaciones, inversión pública y privada, empresas innovadoras, suburbanización de servicios y una distribución policéntrica de los polos de empleo. Así muchas empresas se han trasladado, total o parcialmente, a municipios (alcaldías, delegaciones) metropolitanos suburbanos, donde aprovechan espacios adicionales de alta calidad a precios/rentas asequibles (Rebello, 2011, p. 85).

Como consecuencia de la aceleración del modelo de crecimiento urbano en las ciudades latinoamericanas, como la CDMX, se tiene una competencia entre sus territorios para atraer capitales. Además de acentuar las desigualdades sociales y la fragmentación territorial, las condiciones de competitividad de los mercados financieros y comerciales reconfiguran sectores urbanos en plazos cada vez más breves. Se comienzan a materializar cambios económicos, sociales y tecnológicos que dan lugar a una reconfiguración de los espacios urbanos asignando a la iniciativa privada y a los desarrolladores o promotores inmobiliarios un protagonismo inusitado.

## **Bibliografía**

Borsdorf, A. (2003). La segregación socioespacial en ciudades latinoamericanas: el fenómeno, los motivos y las consecuencias para un modelo del desarrollo urbano en América Latina, en José Luis Luzón, Christoph Stadel y César Borges

- (coords.). *Transformaciones regionales y urbanas en Europa y América Latina*. Barcelona, Universidad de Barcelona.
- Cevallos, M.G. (2000). Un Mercado con mucho Movimiento. *Revista Digital Obras Web*.
- Coulomb Bosc, R. (2012). El centro de la Ciudad de México frente al desafío de un desarrollo urbano más sustentable (elementos para el proyecto de investigación Hábitat y Centralidad). *Hábitat y centralidad en México. Un desafío sustentable*, Coulomb, René; Esquivel, Teresa y Gabriela Ponce (Coords.), Centro de Estudios Sociales y de Opinión Pública, 17-57.
- Cruz, F., & G. Garza (2014). Configuración microespacial de la industria en la Ciudad de México a inicios del siglo XXI. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 29(85), 9-52. <https://doi.org/10.24201/edu.v29i1.1454>
- Fedele, J., & I. Martínez. (2015). Verticalización y desarrollo inmobiliario del núcleo urbano central de Santa Fe: Cambios morfológicos, conflictos urbanos y regulaciones edilicias en la recuperación poscrisis 2001. *Cuaderno Urbano, Espacio, Cultura, Sociedad*, 18(18), 65-88. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=369239304004>
- Ford, L. R. (1996). A new and improved model of Latin America City Structure. *Geographical Review*, 86(3), 437-440. <https://doi.org/10.2307/215506>
- Glaeser, E. (2011). *El Triunfo de las Ciudades*. Madrid: Taurus.
- Griffin, E. & L. Ford. (1980). A model of Latin American City Structure. *Geographical Review*, 70(4), 397-422. <https://doi.org/10.2307/214076>
- Herce Vallejo, M. (2013). *El negocio del territorio. Evolución y perspectivas de la ciudad moderna*. Barcelona: Alianza.
- Hewitt, L. & S. Graham. (2015). Vertical cities: Representations of urban verticality in 20th-century science fiction literature, *Urban Studies*, 52(5), 923-937. <https://doi.org/10.1177/0042098014529345>
- Janoschka, M. (2004). El modelo de ciudad latinoamericana. Privatización y fragmentación del espacio urbano de Buenos Aires: el caso Nordelta, Velch, M. (Ed.), *La ciudad en cuestión. Nuevos Lugares, viejos espacios*. Buenos Aires: Biblos, 80-117.
- Macedo, S. S. (1991). O processo de verticalização e a paisagem da cidade. *Revista Sinopse*, 15, 68-76.
- Mendes, C. Miranda (2009). Aspectos culturais do consumo e da mercantilização do processo de verticalização do eixo Maringá, Londrina, Arapongas e Apucarana (PR) Brasil. In: Mendes, C. M.; Tows, R. L. (Orgs.) *A geografia da verticalização em algumas cidades médias no Brasil*. Maringá: EDUEM, 15-32.
- Pacione, M. (2005). *Urban geography. A global perspective* (2nd. Ed.). Londres: Routledge.
- Paris, M. (2013). De los centros urbanos consolidados a los lugares de centralidad: una propuesta metodológica para su estudio. *Ciudades*, 16(1), 47-69.
- Parnreiter, C. (2011). Formación de la ciudad global, economía inmobiliaria y transnacionalización de espacios urbanos. El caso de ciudad de México. *Eure*, 37(111), 5-24. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612011000200001>
- Parnreiter, C. (2016). La producción de los espacios de la ciudad global: planificación estratégica, megaproyectos y las "necesidades" de mercado inmobiliario. *Revista de Geografía Norte Grande*, 64, 151-166. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022016000200010>
- Pradilla Cobos, E. (2011). Zona Metropolitana del Valle de México: una ciudad baja, dispersa, porosa y de poca densidad. En E. Pradilla C. (Comp.), *Ciudades compactas, dispersas, fragmentadas*.

- Pradilla Cobos, E. (2015). De la ciudad compacta a la periferia dispersa. *Ciudades*, 106, 2-9.
- Ramires, J. C. de Lima (1998). *A verticalização do espaço urbano de Uberlândia: uma análise da produção e do consumo da habitação*. [Tese Doutorado em Geografia, São Paulo] Universidade Sao Paulo (USP).
- Rebello, E. M. (2011). Urban planning in office markets: A methodological approach. *Land Use Policy*, 28, 83-95.
- Rojas Quezada, C. A., Muñiz Olivera, I. y García López, M. A. (2009). Estructura urbana y policentrismo en el Área Metropolitana de Concepción. *EURE*, 35(105), 47-70. <http://dx.doi.org/10.4067/S0250-71612009000200003>
- Stevens Vázquez, G. S. (2012). La vulnerabilidad hídrica en la ciudad de San Luis Potosí. Un análisis espacial. *Revista Nueva Época*, 2(4), 130-159. <https://doi.org/10.21696/rcsl042012530>
- Souza, M. A. Aparecida de. (1994). *A identidade da metrópole: a verticalização em São Paulo*. São Paulo: Hucitec.
- Töws, R. L. & C. Miranda Mendes (2011). O estudo da verticalização urbana como objeto da geografia: enfoques e perspectivas metodológicas. I Simpósio de Estudos Urbanos: Desenvolvimento Regional e Dinâmica Ambiental. 29 a 31 de agosto.
- Vázquez, A., & L. Fuentes (2015) ¿Una nueva geografía corporativa en Santiago de Chile? *Bitácora*, 25(1), 99-109. <https://doi.org/10.15446/bitacora.v1n25.42438>

## Hemerográficas

*Expansión*. Ranking 2018: Las empresas más importantes de México. Revista Expansión, agosto de 2018. <https://expansion.mx/empresas/2018/08/03/ranking-2018-las-empresas-mas-importantes-de-mexico>

JLL-Jones Lang LaSalle (2012). Latin America Overview Prime Office Market Q4. 33 p.

## Páginas institucionales

INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). <https://www.inegi.org.mx/servicios/datosabiertos.html>

# A Cartografia Histórica de Petrópolis e uma análise geográfica sincrônica para o século XIX (1846-1861)a

The Historical Cartography of Petrópolis and a Synchronic Geographic Analysis for the 19th Century (1846-1861)

Tainá Laeta<sup>1</sup>

Manoel do Couto Fernandes<sup>2</sup>

Mário Gonçalves Fernandes<sup>3</sup>

*Recebido 9 de agosto de 2022; aceito 2 de novembro de 2022*

## RESUMO

A cidade de Petrópolis possui uma trajetória diferenciada em relação as outras cidades brasileiras, pois a conjuntura econômica, política e social sincrônica dão a cidade um caráter singular em sua criação. A compra da fazenda do Córrego Seco realizada em 1830 por Dom Pedro I é a primeira medida para concretização da construção do palácio imperial e a criação de uma povoação denominada Petrópolis. Para o estudo da geografia do passado da cidade imperial de Petrópolis, realizou-se busca por documentos históricos normativos e cartográficos junto as instituições de memória. Nesse sentido, destacam-se três documentos históricos, sendo eles dois normativos: Decreto Imperial nº 155 de 1843, marco de criação da cidade e o último documento, o relatório provincial de 1846, que especifica a distribuição dos prazos imperiais de acordo com o uso da terra e status ocupacional dos foreiros. Quanto ao documento histórico cartográfico, salienta-se a *Planta Koeler* de 1846, documento norteador desta pesquisa de autoria de Julio Koeler. Além desta, foram analisadas outras quatro plantas históricas, que foram georreferenciadas a partir da base cartográfica na escala 1:10.000 adquirida na Prefeitura Municipal de Petrópolis.

<sup>1</sup> Universidad Federal de Río de Janeiro, Brasil, e-mail: [tainalaeta@gmail.com](mailto:tainalaeta@gmail.com). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1607-5640>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil, e-mail: [manoel.fernandes@igeo.ufrj.br](mailto:manoel.fernandes@igeo.ufrj.br). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4500-0624>

<sup>3</sup> Universidade do Porto, Portugal, e-mail: [mgfernan@letras.up.pt](mailto:mgfernan@letras.up.pt). ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9684-2170>

O georreferenciamento possibilitou a sobreposição dos limites das cinco plantas históricas e junto aos documentos históricos normativos analisar mudanças ocorridas nos limites dessa nova urbe, através da vetorização dos quarteirões e prazos imperiais, além de outras feições constantes nas plantas históricas. Desse modo, com intervalo de quinze anos desde o primeira planta histórica até a última analisada, juntamente aos documentos históricos normativos constatou-se grande expansão dos limites inicialmente traçados na *Planta Koeler*. Desta maneira, as imposições dispostas nos documentos normativos traduzem em Petrópolis uma estratificação social e segregação espacial de padrão espacial característico do século XIX, com a elite instalada junto ao centro, pois era no centro da cidade que se encontravam as mais importantes instituições urbanas.

Palavras-chave: *Cartografia Histórica, Geografia Histórica; Petrópolis/RJ, Planta Koeler, Morfologia Urbana.*

## ABSTRACT

The city of Petrópolis has a differentiated trajectory in relation to other Brazilian cities, because the synchronic economic, political and social conjuncture gives the city a unique character in its creation. The purchase of the *Córrego Seco* farm in 1830 by Dom Pedro I is the first measure to carry out the construction of the imperial palace and the creation of a village called Petrópolis. For the study of the geography of the past of the imperial city of Petrópolis, a search was carried out for normative and cartographic historical documents along with memory institutions. In this sense, three historical documents stand out, two of them normative: Imperial Decree nº 155 of 1843, landmark of creation of the city and the last document, the provincial report of 1846, which specifies the distribution of imperial deadlines according to the use of the land and occupational status of tenants. As for the historic cartographic document, the *Koeler Plan* of 1846 stands out, the guiding document of this research authored by Julio Koeler. In addition to this, four other historical plans were analyzed, which were georeferenced from the cartographic base on a scale of 1: 10,000 acquired from the City Hall of Petrópolis. The georeferencing made it possible to overlap the limits of the five historical plans and together with the normative historical documents to analyze changes that occurred in the limits of this new city, through the vectorization of blocks and imperial terms, in addition to other constant features in the historical plans. Thus, with an interval of fifteen years from the first historical plan to the last one analyzed, together with the normative historical documents, a great expansion of the limits initially drawn in the *Koeler Plan* was verified. In this way, the impositions laid out in the normative documents translate in Petrópolis a social stratification and spatial segregation of a spatial pattern characteristic of the 19th century, with the elite installed close to the center, as it was in the center of the city that the most important urban institutions were located.

Key words: *Historical Cartography, Historical Geography, Petrópolis/RJ, Koeler Plant, Urban Morphology.*

## 1. Introdução

Os municípios da região Serrana do atual estado do Rio de Janeiro em sua história contada e assim no imaginário criado, trazem associado ao processo de ocupação que uma das motivações para a instalação de famílias nessas regiões era a busca por um clima mais ameno que o da capital. Porém, é certo que essa não terá sido a principal razão, pois a motivação, mudança, desbravamento, busca por novos lugares está diretamente relacionada a questão econômica e política vigente ao momento.

Entre os diversos municípios localizados nas montanhas/serras fluminenses está a cidade de Petrópolis, que teve uma trajetória particular quando comparada não só com as cidades fluminenses, mas também em relação à maioria dos municípios brasileiros.

Historicamente, as cidades brasileiras surgiram como vila. Porém, segundo Oliveira Junior (1926, p. 310), até o ano de 1846 Petrópolis era apenas um curato e através da lei nº 397, de 20 de maio de 1846 foi elevado à categoria de freguesia, sob a denominação de São Pedro de Alcantara, compondo parte do município da Estrella, tornando-se município, sob a lei nº 961, de 29 de setembro de 1857.

Essa rápida ascensão na esfera administrativa tinha uma razão de ser: Petrópolis era a cidade onde Dom Pedro II, o Chefe de Estado brasileiro, passou a morar a partir do final da década de 1840. Em pouco tempo, todos os “grandes” da Corte, fossem políticos ou negociantes, tinham suas casas naquela nova urbe, pois ali estava o “centro do poder”.

Em razão desses fatores/aspectos, Petrópolis começou a crescer, e seu desenvolvimento foi representado cartograficamente, com uma frequência pouco encontrada em outras cidades ou vilas brasileiras.

Além dessa particularidade, há outras, por vezes pouco lembradas.

A “cidade de Pedro” fora planeada não em terras públicas ou doadas para esse fim, mas dentro de uma propriedade que pertencia ao próprio monarca, e que foi particionada de uma forma bastante específica para a época, sendo inclusive estabelecido previamente as disposições dos quarteirões e como e por quem seriam ocupados.

A cidade de Petrópolis em sua divisão político-administrativa pensada por Julio Frederico Koeler, possui a particularidade de ser dividida inicialmente em onze quarteirões e duas vilas imperiais, onde estes quarteirões e vilas se assemelham a atual divisão político-administrativa em bairros, e já os prazos imperiais correspondem aos terrenos.

A Companhia Imobiliária de Petrópolis originária da Superintendência da Fazenda Imperial ainda mantém o direito legal a cobrança de foro sobre os prazos (terrenos), mesmos os parcelados posteriormente, tendo inclusive preferência de compra em uma eventual alienação dessas terras usufruídas em regime de enfiteuse, com um recolhimento de 2,5% a título de laudêmio no valor de alienação desses imóveis localizados no primeiro distrito do município (Ambrozio, 2012, p. 1-7). Esta Companhia é considerada a entidade jurídica que mantém o controle de cobrança sobre as propriedades na qual a cidade se originou.

A enfiteuse é compreendida como sendo um instituto do Direito Civil e também o mais amplo dos direitos reais. Aos enfiteutas é dado o direito do domínio útil ou também conhecido como domínio limitado, dando o direito de desfrutar de todas as qualidades da coisa, sem destruir a sua substância.

Entretanto, isso, mediante a uma das duas imposições colocadas aos foreiros, que é pagar ao senhorio uma prestação anual invariável denominada foro; a segunda obrigação é a de dar ao proprietário o direito de preferência, toda vez que for alienar o prazo (terreno). Salvo o caso do senhorio não demonstrar preferência de alienação, este terá o direito ao *laudêmio*, que se traduz na porcentagem de 2,5% sobre o negócio realizado.

Um dos fatores que delimitam a criação da cidade são os seus cursos d'água. Os rios da cidade de Petrópolis têm por característica serem de pequeno porte e não sendo de uso para navegação fluvial. Entretanto, os mesmos rios dão a cidade um caráter delineador no processo de ocupação, visto que foi a partir de seus vales que Koeler estabeleceu a área inicial de instalação do núcleo urbano.

Tanto assim, que os primeiros onze quarteirões imperiais e suas duas vilas imperiais foram delimitados ao longo de três principais cursos d'água, a saber são eles: rio Piabanha como principal curso d'água, contando ainda com o rio Quitandinha e o rio Palatino (antigo Córrego Seco) (Lordeiro, 2005, p.23).

## 2. Área de estudo

O município de Petrópolis encontra-se localizado na região Serrana do estado do Rio de Janeiro, ao norte na região Metropolitana da cidade do Rio de Janeiro (RMRJ), entre as coordenadas 43°22' e 43°00' a oeste e 22°34' e 22°12' ao sul.

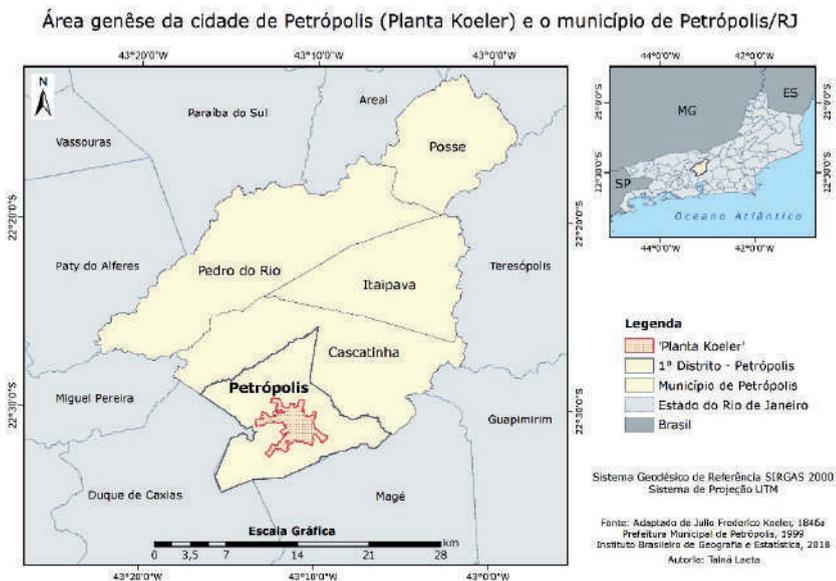
O município conta com uma área de 795.769 km<sup>2</sup>, uma população de 295.917 habitantes para o ano de 2010, e com população estimada de 306.191 habitantes para o ano de 2019, segundo o Censo Demográfico de 2010 (IBGE, 2011, p. 84; <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rj/petropolis/panorama>).

Inicialmente Petrópolis passa a categoria de município a partir da Lei n° 961, de 29 de setembro de 1857 (Brasil, 1857). E em conjunto com decretos estaduais são criados os distritos de: Petrópolis, Cascatinha, Itaipava, Pedro do Rio e São José do Rio Preto. Destaca-se que em 17 de junho de 1859 foi instalada a primeira Câmara Municipal e eleito seu primeiro presidente, o Comendador Albino José de Siqueira (Fróes, 2002, p. 9).

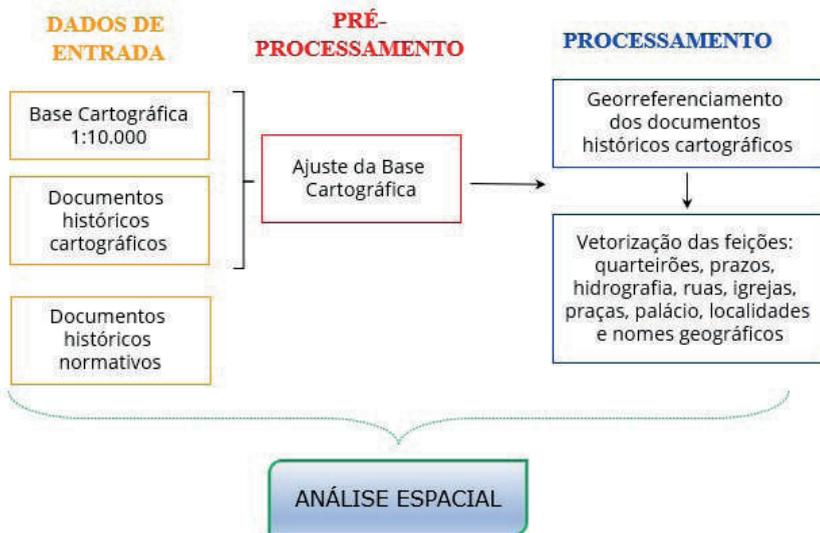
A área gênese traçada por Koeler é de 15,62 km<sup>2</sup>, correspondendo a 11,75% da área do 1° distrito de Petrópolis e 1,96% da área total do município (Figura 1).

## 2. Roteiro metodológico

Para elaboração da pesquisa, primeiramente realizou-se concomitantemente o levantamento de documentos históricos cartográficos e histórico documental, sejam normativos, através de decretos e leis, como também publicações em jornais e artigos da época (Figura 2). Seguidamente foi realizado o georreferenciamento dos documentos históricos cartográficos e realizada a vetorização das feições contidas nos referidos documentos.



**Figura 1.** Mapa de localização do município de Petrópolis.  
Fonte: elaboração própria.



**Figura 2.** Fluxograma do roteiro metodológico.  
Fonte: elaboração própria.

## 2.1 Levantamento dos documentos históricos cartográficos

Nesta fase realizou-se o levantamento de documentos históricos cartográficos referentes a área gênese da imperial cidade de Petrópolis no século XIX. Foram descobertos cinco documentos históricos cartográficos, que foram elaborados em um intervalo temporal de 15 anos (1846-1861).

O primeiro documento cartográfico, *Planta de Petropolis - 1846*, também conhecida como Planta Koeler, de autoria de Julio Frederico Koeler, foi adquirido na Companhia Imobiliária de Petrópolis a partir de fotografias, tanto em tomada total (Figura 3) como de um conjunto de 191 fotos.

Os documentos cartográficos seguintes são: *Planta de Petropolis - 1846*, também de autoria de Julio Frederico Koeler, *Planta de Petropolis - 1850* de autoria desconhecida e a *Planta da Imperial Colonia de Petropolis (reduzida para guia dos visitantes) - 1854* assinado por Otto Reimarus. Os três documentos encontram-se sob os cuidados da Biblioteca Nacional e podem ser consultados em seu sítio eletrônico (<http://bndigital.bn.gov.br/acervodigital/>).



**Figura 3.** Planta de Petropolis - 1846, elaborada por Julio Frederico Koeler, com dimensões de 129,2 centímetros de altura por 128,9 centímetros de largura. Fonte: Companhia Imobiliária de Petrópolis e Acervo do Laboratório de Cartografia - GeoCart/UFRJ.

O último documento cartográfico pesquisado é planta da *Imperial Cidade de Petrópolis e os quarteirões coloniaes (planta reduzida) – 1861*, de autoria de Carlos Augusto Taunay, obtida no Arquivo Histórico do Museu Imperial (Ibram/MinC/ nº29/2017).

## 2.2 Levantamento histórico documental

Concomitante ao levantamento dos documentos históricos cartográficos, também realizou-se o levantamento de documentos históricos normativos referentes a fundação da cidade de Petrópolis, para uma melhor compreensão do processo de ocupação.

O primeiro documento é a Escritura de Venda de huma Fazenda de cultura, e suas benfeitorias, plantas e cazas, e todos os seus pertences, que a Sua Magestade Imperial fazem Jose Vieira Affonso, e sua mulher e quitação, como abaixo se declara, que se encontra sob guarda do Arquivo Público Nacional (AN). Será sob as terras desta fazenda que se assentará a maior parte do núcleo inicial da povoação da futura Petrópolis.

O segundo documento que se conseguiu acesso foi o *Decreto Imperial nº 155*, também conhecido como “Plano-Povoação Palácio de Verão”, assinado por Sua Magestade Imperial Dom Pedro II e por seu Mordomo da Casa Imperial, Paulo Barbosa. É este documento que marca a fundação e o início do processo de ocupação da cidade de Petrópolis, estando sob os cuidados do Arquivo Público Nacional (AN).

Os três documentos seguintes são caracterizados por um conjunto de normas, isto é, condições com que as terras da futura Petrópolis deverão ser arrendadas. Estes documentos foram obtidos a partir das publicações da Comissão do Centenário de Petrópolis, em comemoração ao centenário da cidade no ano de 1943.

Posterior a este conjunto de três documentos, há o Relatório do presidente da Província do Rio de Janeiro, o senador Aureliano de Sousa e Oliveira Coutinho, na abertura da Assembléa Legislativa Provincial no 1º de março de 1846, acompanhado do orçamento da receita e despesa para o ano financeiro de 1846 a 1847.

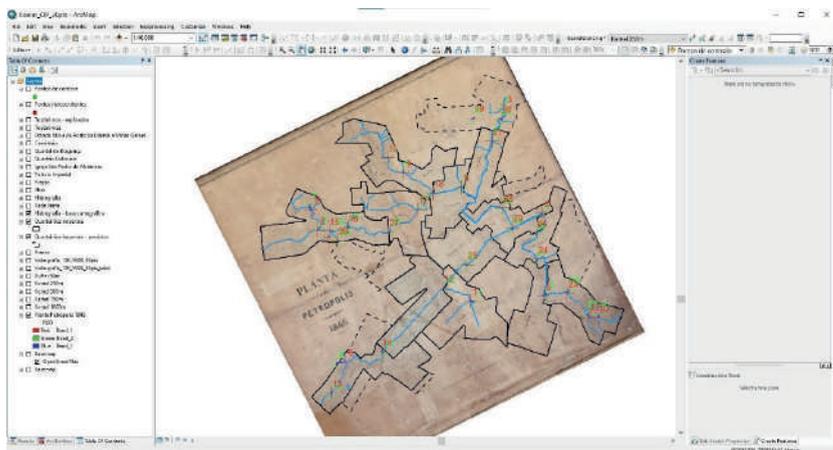
O relatório autoriza a contratação de colonos estrangeiros para as obras do núcleo de povoação da futura Petrópolis e estabelece as regras para a distribuição dos prazos imperiais aos colonos, considerando a proximidade do Palácio Imperial, tipo de uso/atividade a ser desenvolvida e as dimensões dos prazos.

## 2.3 Georreferenciamento das plantas históricas

O crescente uso das geotecnologias em mapas históricos, através do georreferenciamento permite que haja uma compatibilização, ou melhor, sobreposição das plantas históricas e a base cartográfica, proporcionando uma melhor análise nas mudanças ocorridas no espaço geográfico em momentos distintos.

A base cartográfica utilizada foi obtida junto a Prefeitura Municipal de Petrópolis (PMP) – Coordenadoria de Planejamento e Gestão Estratégica ou Secretaria de Planejamento e Urbanismo na escala 1:10.000 e levantada no ano de 1999. A mesma se encontrava na projeção Universal Transversa de Mercator – UTM e no sistema geodésico SAD69 (*South American Datum 1969*), fuso 23. Posteriormente, na plataforma ArcGIS 10.1 os dados foram reprojetados para o sistema geodésico SIRGAS 2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas) (Figura 4).

Vale destacar que, os dados de mapeamento para essa escala contemplaram a totalidade da área das plantas históricas pesquisadas.



**Figura 4.** Distribuição dos 30 pontos de controle utilizados no processo de georreferenciamento da *Planta de Petrópolis – 1846*.

Fonte: Laeta (2021).

Seguido ao processo de georreferenciamento dos cinco documentos históricos cartográficos estudados, foi realizada a vetorização e extração das informações contidas nas mesmas, isto é, tanto no que tange as informações de cunho cartográfico, quanto informações sobre quem foi seu elaborador, onde foi reproduzido (impresso) o documento.

Nesse sentido, é importante destacar das informações extraídas, aqueles referentes a demarcação/limite dos quarteirões e prazos imperiais, extensão frontal e lateral destes prazos (terrenos), pois será de grande contribuição para entender a organização espacial e estratificação social no bojo do nascimento da imperial cidade de Petrópolis.

### 3. Resultados

Após o processo de georreferenciamento das plantas históricas da imperial cidade de Petrópolis e extração de suas feições geográficas, observou-se que no

intervalo de quinze anos na elaboração dos documentos históricos cartográficos houve uma expansão significativa da área inicial projetada por Koeler.

A *Planta de Petropolis – 1846* (Biblioteca Nacional) também elaborada por Julio Frederico Koeler juntada ao relatório provincial não apresentou informações sobre identificação dos prazos aforados e dos colonos.

O documento histórico cartográfico seguinte, *Planta de Petropolis – 1850*, foi elaborada apenas quatro anos após o primeiro documento de Koeler e é neste documento que aparecem delimitados os novos nove quarteirões imperiais: Brasileiro, Presidencia, Francez, Inglez, Suisso, Woerstadt, Darmstadt, Rhenania Superior e Worms. A adição desses novos quarteirões imperiais mostra uma grande expansão da sua área gênese inicial, também configurada pelo acréscimo de 294 prazos relativos a estes novos quarteirões criados.

Na planta de Otto Reimarus de 1854 no que diz respeito aos quarteirões e prazos originais, quase nada se alterou da *Planta Koeler*. A *Planta Koeler* somou um total de 855 prazos imperiais e a planta de Reimarus um total de 848, ou seja, uma diferença de 7 prazos da planta histórica de 1846 para a de 1854. No entanto, vale ressaltar que o quarteirão Vila Imperial apresentou um acréscimo de 31 prazos imperiais (Tabela 1).

No que se refere aos novos quarteirões e prazos imperiais criados, houve uma adição de 351 prazos, isto é, houve um aumento de 41% da quantidade de prazos a serem aforados.

**Tabela 1.** Relação da quantidade de prazos de acordo com as quatro classes estipuladas pelo Relatório da Província de 1846

<i>Plantas x classes</i>	<i>Koeler 1846_cip</i>	<i>Koeler 1846_bn</i>	<i>Relatório província 1846</i>	<i>Desconhecida 1850_bn</i>	<i>Reimarus 1854_bn</i>
1º	210	207	216	n/a**	241
2º	26	26	26	26	26
3º	181	173	169	96	183
4º	431	441	440	704	744
Outros	7	7	—*	1	5
Total	855	854	851	827	1.199

**Fonte:** Laeta (2021).

\* Os prazos de construções específicas foram considerados na contagem do total de prazos de 1ª (na Villa Imperial) e 3ª classe (quarteirão Nassau), pois estes não foram discriminados no relatório da província.

\*\* Na planta 1850\_BN, a Villa Imperial apresenta somente os limites de seu quarteirão, ou seja, não possui a demarcação dentro de seus limites dos prazos imperiais pertencentes a Villa Imperial. Assim, não foi possível contabilizar o total de prazos de 1ª classe, e, deste modo, considerou-se como não aplicável (n/a) a divisão por prazos na Villa Imperial.

## 4. Discussão

A análise da configuração territorial de Petrópolis não foi definida a partir dos primeiros movimentos colonizadores em terras brasileiras, mas sim como um processo que se iniciou no final do século XVII e início do século XVIII. Pois no primeiro século de colonização, a colônia tinha característica marcante de sua configuração socioespacial ocorrer exclusivamente no litoral (Azevedo, 1992, p. 5; Straforini, 2006, p. 2).

Os caminhos do ouro foram fundamentais na criação da cidade de Petrópolis. Desde os tempos coloniais foram estabelecidos caminhos de ligação entre o litoral, mais especificamente entre as cidades portuárias e o interior da colônia, precisamente para a Comarca da Vila Rica, onde desde o final do século XVII descobriu-se ouro em abundância, e esta comarca contava com povoações de destaque, como Vila Rica (Ouro Preto) e Mariana (Costa, 2015, p. 86; Santos *et al.*, 2011, p. 295).

A partir da descoberta aurífera e da necessidade de instalação de postos fiscais para controle no tráfego destes metais que os caminhos para as Minas Gerais ganharam impulso, sempre com o intuito de encurtar o tempo e trazer mais segurança ao ataque de corsários.

Inicialmente durante o século XVII, foram abertos dois caminhos, o primeiro denominado de “Caminho Velho de São Paulo”, que fazia a ligação entre os portos do Rio de Janeiro e São Vicente (SP), continuando pelos vales dos rios Tietê e Paraíba do Sul. Posteriormente, por uma necessidade de segurança foi criada a variante terrestre, denominada “Variante do Caminho Velho”, entre Taubaté no vale do Paraíba do Sul e o porto de Paraty, acarretando assim um menor tempo na ligação terrestre com o porto do Rio de Janeiro, como também manteve sua rota mais próxima a costa brasileira.

Ainda na segunda metade do século XVII, devido a intensificação das atividades mineiras foi criado o “Caminho Novo”, cujo objetivo era transpor diretamente a serra do Mar, o que fazia o caminho ser ainda mais seguro e curto entre as Minas Gerais e o Rio de Janeiro, porto oficial do embarque de ouro nas “naus do quinto real” com destino à Corte de Lisboa. Este caminho também ficou conhecido como também conhecido como “Caminho do Garcia”, “Caminho do Couto”, “Caminho do Pilar” ou “Caminho Novo” do Rio de Janeiro para as minas.

Segundo Fróes (2006, p. 2), o “Caminho Novo” foi o ponto inicial para a ocupação das terras devolutas da bacia do Médio Inferior do Vale do Paraíba, onde mais tarde seriam delimitadas as terras do futuro município de Petrópolis, e confirmadas pela necessidade da abertura de um novo caminho, a “Variante do Caminho Novo”.

### 4.1. Os documentos históricos normativos de Petrópolis

O *Decreto Imperial nº 155*, foi assinado na data de 16 de março de 1843, no Paço da Boa Vista por Sua Majestade Imperial Dom Pedro II e por seu Mordomo da Casa Imperial, Paulo Barbosa.

No referido decreto já constavam algumas exigências a serem contempladas com o arrendamento no valor de 1:000\$000 (um conto de réis) anuais sobre a fazenda do Córrego Seco ao Major de Engenheiros Julio Frederico Koeler, dentre elas: reservar um terreno para edificar um palácio com dependências e jardins; um terreno para uma povoação, com prazos aforados a particulares de 5 braças<sup>1</sup> indivisíveis pelo preço que for convencionado, mas nunca menos de 1\$000 (mil réis) por braça; inclui também para serem aforados prazos com 100 braças de um lado e do outro da “Estrada Geral”; demarcar um terreno para edificar uma igreja; e um terreno destinado ao cemitério da futura povoação (Brasil, 1843).

O decreto imperial expressa o objetivo de rendimento com os prazos a serem aforados, pré-estipulando os valores a serem cobrados por braça.

Pouco depois do decreto imperial anteriormente mencionado, a Escripura de arrendamento da Fazenda denominada Corrego Seco, sita no alto da Serra da Estrella, que faz o Ex.<sup>mo</sup> Mordomo da Caza Imperial, ao Major de Engenheiros Julio Frederico Koeler é assinada em 26 de julho de 1843.

Este documento já em seu cabeçalho destaca que a fazenda do Córrego Seco, situada na serra da Estrella e arrendada a Julio Frederico Koeler pertencia aos bens particulares do imperador: “se convencionarão nas condições com que aquelle Major toma de arrendamento á Caza Imperial a Fazenda denominada <<Corrego Seco>>, sita na Serra da Estrella, pertencente aos bens particulares de Sua Magestade Imperial”.

O trecho destacado acima estabelece que as terras da fazenda do Córrego Seco pertencem aos bens particulares de Sua Magestade Imperial e por isso seu rendimento da cobrança de foro era destinado ao monarca em particular e não aos cofres públicos do império.

Destaca-se que neste documento no Art. 10. aparece pela primeira vez a menção ao documento histórico *Planta de Petropolis - 1846*, no qual o arrendatário, Julio Frederico Koeler, fica obrigado a levantar a “planta da futura Petropolis, e do Palacio e suas dependencias gratuitamente”.

No mesmo dia e ano em que foi lavrada a escritura do contrato de arrendamento da fazenda do Córrego Seco de Sua Magestade Imperial a Julio Frederico Koeler na data de 26 de julho de 1843, outro documento também foi redigido, estipulando as condições em que seriam aforadas as terras do contrato de arrendamento desta dita fazenda a Julio Frederico Koeler sob o título: *Condições com que se aforão terras na Fazenda de Sua Magestade o Imperador, denominada <<Corrego Seco>> e que fazem parte do contracto de arrendamento que faz o Sr. Major Koeler.*

O documento normativo, *Condições com que se aforão as terras de Petropolis, e as do arrendamento do Major Julio Frederico Koeler* foi elaborado três meses depois do anterior, na data de 30 de outubro de 1843, os quais são listados 16 artigos muitos dos quais ratificando e complementando os dispositivos do contrato anterior. Nele estão as instruções para os aforamentos dos prazos

<sup>1</sup> Antiga medida portuguesa, onde 1 braça equivale a 220 centímetros (Marques, 2001, p. 23).

arrendados a Koeler que formarão a futura Petrópolis em condições de enfiteuse.

Após aparecer pela primeira vez uma alusão a *Planta Koeler*, no Art. 10. do documento do contrato de arrendamento das terras de Sua Majestade Imperial a Julio Frederico Koeler, essa é a segunda vez que a *Planta Koeler* é citada. Assim, o Art. 1º estabelece que a “A futura Petrópolis constará do terreno descrito e marcado no mappa levantado pelo arrendatario Koeler, e do que para o futuro Sua Magestade Houver por bem designar”.

O último documento normativo é o Relatório do presidente da província do Rio de Janeiro, o senador Aureliano de Sousa Coutinho, na abertura da assembléa legislativa provincial no 1º de março de 1846, acompanhado do orçamento da recita e despeza para o anno financeiro de 1846 a 1847 – Colonização. Este documento foi publicado concomitante ao momento de finalização da *Planta Koeler* no ano de 1846 o qual distinguirá pela primeira os prazos por classes, cujos critérios serão as dimensões e principalmente o uso da terra.

Desta maneira, os prazos de 1ª classe possuem 10 braças de frente por 70 braças de fundo e ocupam a frente das ruas e praças da Villa Imperial e são os prazos próximos palácio imperial. Devem ocupar estes prazos negociantes, artistas e pessoas da corte que desejam passar o verão em um clima mais temperado da serra.

Os prazos de 2ª classe localizam-se nos terrenos do subúrbio da Villa Theresa e são os mais próximos ao Alto da Serra, ou seja, a Villa Imperial e possuíam como condição para aforamento as mesmas dos prazos de 1ª classe. Tinham estipulado como dimensões 15 braças de frente e 100 ou mais braças de fundo.

Os prazos de 3ª classe se localizavam a beira da “Estrada Geral” exceto os 26 prazos citados acima pertencentes a 2ª classe e eram destinados a artistas que não se ocupassem muito da lavoura. Possuíam as mesmas dimensões que os anteriores: 15 braças de frente por 100 ou mais braças de fundo.

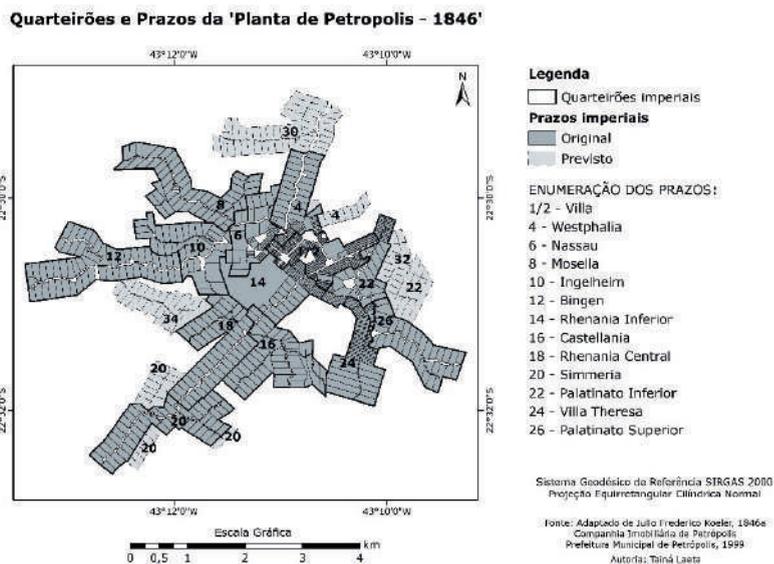
Por último, os prazos de 4ª classe, considerados todos os outros prazos existentes, ou seja, terrenos do interior, dentro dos limites da fazenda destinados a lavoura e com dimensões de 50 braças de frente por 100 ou mais braças de fundo.

A sucessão de elaboração dos acima expostos e suas normativas apontam já uma estratificação social. O que fica mais evidente neste último documento, o relatório provincial, com a distribuição ser condicionada ao ofício do foreiro.

#### **4.2 Os propósitos das plantas históricas cartográficas de Petrópolis**

O primeiro documento cartográfico de Petrópolis, de autoria de Julio Frederico Koeler, julga-se ser a planta de trabalho (ou de campo) do engenheiro alemão. O que se justificaria por observar na planta intervenções diretas como, por exemplo, anotações de cálculos e indicações de novos quarteirões e prazos a distribuir, isto é, a existência da delimitação de prazos destinados a expansão da cidade.

O propósito do documento cartográfico *Planta de Petrópolis – 1846* (Figura 5), é que esta planta serviu para o controle de distribuição e ocupação dos primeiros prazos do núcleo urbano inicial da cidade de Petrópolis e consequentemente realizar a cobrança de foro sobre os prazos aforados.



**Figura 5.** Enumeração estipulada por Koeler na *Planta de Petrópolis – 1846* da Companhia Imobiliária de Petrópolis para identificação dos quarteirões e prazos imperiais. Fonte: Laeta (2021), adaptado de Julio Frederico Koeler (1846a).

Tudo isso cumprindo as exigências que constavam nos documentos normativos. Nota-se esse propósito pelas suas anotações referentes aos nomes dos colonos (foreiros) a ocuparem os prazos, assim como, o número de cada prazo e indicação do local de construção dentro do limite de cada prazo e as dimensões dos prazos de acordo com sua classe (Figura 6).

Tanto assim serviu para controle, que a numeração dos prazos tinha em sua lógica ser sempre iniciada por número par, identificando cada quarteirão, onde os dois últimos números eram de controle de ordenação do foreiro e os números iniciais referirem-se ao número de identificação do quarteirão.

A *Planta de Petrópolis – 1846*, guardada na Biblioteca Nacional, também elaborada por Julio Frederico Koeler, teve como propósito ser juntada ao Relatório do presidente da Província do Rio de Janeiro, o senador Aureliano de Sousa e Oliveira Coutinho, na abertura da Assembléa Legislativa Provincial no 1º de março de 1846, acompanhado do orçamento da receita e despesa para o ano de 1846 a 1847 – Colonização. O que fica evidenciado por constar na planta a inscrição “Mandada levantar pelo Presidente da Província do Rio de Janeiro O

Excelentíssimo Senhor Conselheiro Aureliano de Souza Oliveira Coutinho, para se juntar ao seu relatório”.



**Figura 6.** Enumeração estipulada por Koeler na *Planta de Petrópolis - 1846* da Companhia Imobiliária de Petrópolis para identificação dos quarteirões e prazos imperiais. Fonte: Laeta (2021).

Neste relatório foram estipuladas as condições de distribuição dos prazos imperiais de acordo com a atividade desenvolvida. Para o processo de controle e distribuição, foi utilizada a planta anterior, ou seja, a planta de campo de Koeler, visto que na planta juntada ao relatório da província não constavam informações sobre o número dos prazos, como também os nomes dos foreiros.

Esta segunda planta elaborada por Koeler, contava com os mesmo onze quarteirões e duas vilas imperiais, mas com um total 854 prazos imperiais. Tal diferença pode ser relativizada por ser a primeira considerada de campo e a segunda ser o documento cartográfico juntado ao relatório provincial para assim implementar o “Plano-Povoação Palácio de Verão”.

Salienta-se que as plantas elaboradas por Koeler e guardadas da Companhia Imobiliária de Petrópolis e na Biblioteca Nacional, possuem respectivamente a escala de 1:5.000 e 1: 10.000, assim se enquadram dentro da escala de mapeamento cadastral.

Segundo Dorling & Fairbairn (1997, p. 83), os mapas cadastrais são mapas elaborados com o objetivo de ajudar no registro da propriedade das parcelas de terra, especificamente com a finalidade de cadastro fiscal e legal. As plantas elaboradas por Koeler apresentam essas finalidades, uma vez que, no que diz respeito ao cadastro fiscal há cobrança de foro e para o cadastro legal há o registro da parcela, tanto em escritura quanto no mapa.

A *Planta de Petrópolis - 1850*, foi elaborada apenas quatro anos após o primeiro documento de Koeler. Assim como a planta juntada ao relatório da província, não apresentou informações sobre identificação dos prazos aforados e dos colonos. Entretanto, é neste documento que aparecem delimitados os

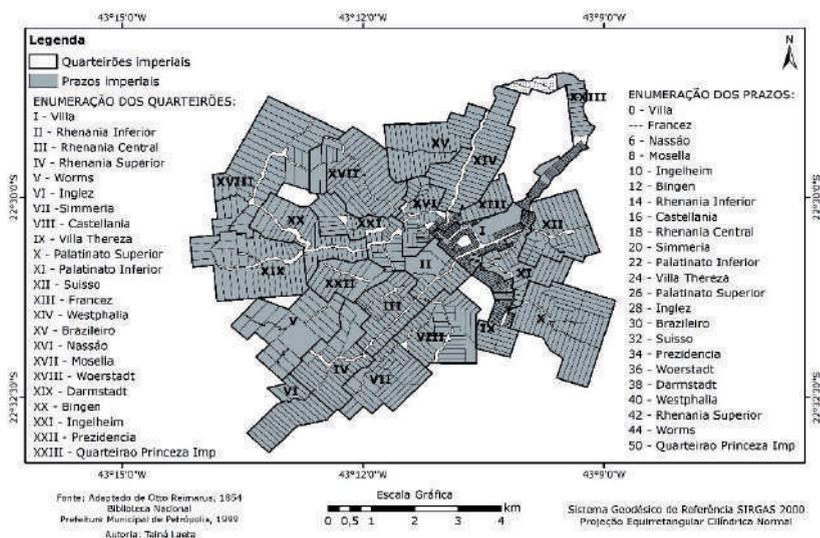
novos nove bairros imperiais: Brasileiro, Presidencia, Francez, Inglez, Suíço, Woerstadt, Darmstadt, Rhenania Superior e Worms, mostrando assim uma grande expansão da sua área gênese inicial.

Assim como a planta de Koeler, o quarto documento histórico cartográfico, a planta de Otto Reimarus enumera os bairros imperiais seguindo as mesmas orientações estipuladas por Koeler, tanto no que diz respeito aos bairros existentes nos bairros originais, quanto nos bairros e bairros previstos por Koeler (Figura 7). Com isso, constata-se o propósito de controle de ocupação dos bairros originais e controle de ocupação e distribuição dos novos bairros.

A planta de 1854 de Otto Reimarus, apesar de ter escala 1:34.000, ou seja, não se enquadrar na escala de mapeamento cadastral, cumpre o papel fiscal e legal de cadastro, visto que é utilizada até os dias de hoje para o controle e ocupação da cidade. Esta planta provavelmente foi elaborada a partir de um documento cartográfico em escala maior, e isto pode ser confirmado pelos documentos em escala menor elaborados anteriormente por Koeler. Reimarus, utilizou-se do artifício da legenda para representar feições que na *Planta Koeler* constavam no próprio desenho.

Na planta de Otto Reimarus, na vetorização das feições do documento cartográfico referente aos bairros imperiais, foram contabilizados um total de 1.199 bairros imperiais (Tabela 1). Já no que se refere aos bairros e vilas imperiais da planta de 1850 os mesmos se mantiveram, havendo no entanto o acréscimo do bairro "Princezalmp".

#### Quarteirões e Praços da 'Planta da Imperial Colonia de Petropolis - 1854'



**Figura 7.** Enumeração estipulada por Reimarus na *Planta da Imperial Colonia de Petropolis - 1854* para identificação dos bairros imperiais.

Fonte: Laeta (2021), adaptado de Otto Reimarus (1854).

A planta de Taunay de 1861, diferentemente das anteriores pode ser entendida para fins de vilegiatura, pois não possui informações importantes no que tange ao propósito de controle de ocupação sobre os prazos imperiais distribuídos.

Este último documento histórico cartográfico possui os limites de seus quarteirões não tão bem definidos e demarcados, e nem por essa razão pode ser entendido como sendo um produto mal elaborado, mas sim elaborado para atender aos seus propósitos, que era o de divulgar, disseminar para fins turísticos a imperial cidade de Petrópolis.

A planta de Taunay de 1861 está na escala 1:42.000, o que sugere que esta planta histórica tomou como referência um planta em escala maior para o traçado das feições que nela constam.

Após o exposto, compreende-se que os documentos históricos cartográficos *Planta de Petropolis - 1846* da Companhia Imobiliária de Petrópolis e *Planta da Imperial Colonia de Petropolis (reduzida para guia dos visitantes) - 1854*, em conjunto com os documentos normativos, serviram para o controle de ocupação da imperial cidade de Petrópolis, e conseqüentemente cobrança de foro, visto a manutenção das informações que constavam em ambas as plantas relativas ao número de identificação dos quarteirões e prazos imperiais.

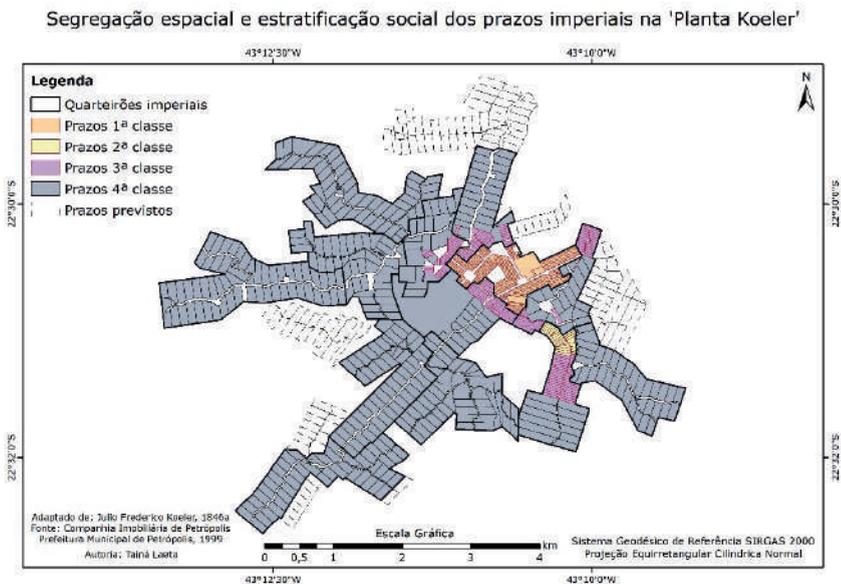
### **4.3 Segregação espacial e estratificação social no traçado urbano dos quarteirões e prazos imperiais da cidade imperial de Petrópolis**

A cidade de Petrópolis nasce com o ideário de uma colônia agrícola através do “Plano-Povoação Palácio de Verão”. Na compreensão do espaço urbano da cidade petropolitana para o recorte temporal estudado observa-se diferentes usos da terra justapostos acarretando o estabelecimento de áreas específicas.

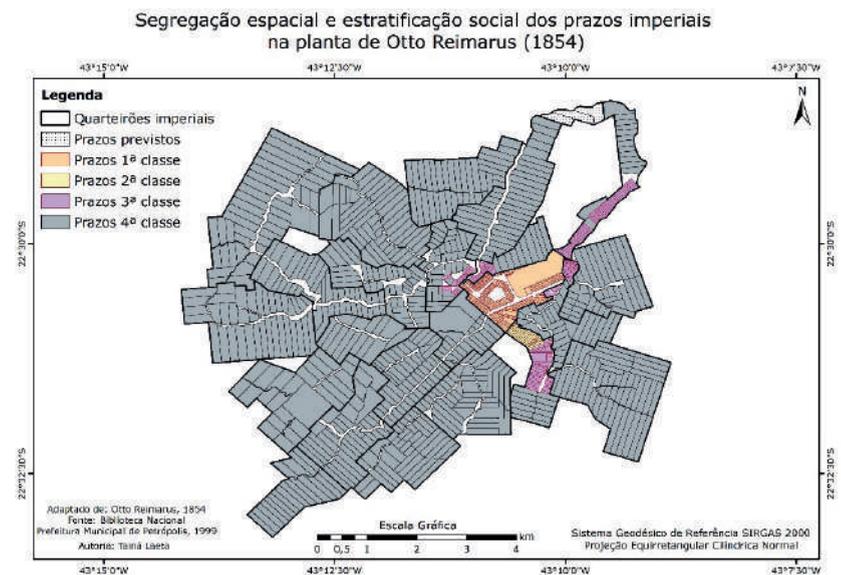
O processo de distribuição dos prazos nos quarteirões imperiais estabeleceu a estratificação social e segregação espacial a partir da *Planta de Petropolis - 1846* (Companhia Imobiliária de Petrópolis) e o relatório provincial de 1846.

Os prazos de 1ª e 2ª classes eram destinados mais a nobreza e a artistas, isto é, esses prazos configuravam uma área residencial com forma e conteúdo social diferenciado. Esses prazos se encontravam no próprio centro da cidade, também era nesta área central que se encontravam atividades de lazer, comercial e serviços. A área central guardava alto grau de especulação imobiliária por serem os prazos que se encontravam nas proximidades da residência de Sua Majestade Imperial (Figura 8).

Observou-se nas plantas históricas seguintes: Planta de Petropolis - 1850, Planta da Imperial Colonia de Petropolis (reduzida para guia dos visitantes) - 1854 (Figura 9) e para Imperial Cidade de Petropolis e os quarteirões coloniaes (planta reduzida) - 1861 a ratificação da mesma organização espacial. A organização espacial ou espaço urbano petropolitano, como o de qualquer espaço de cidade capitalista, é marcado por definições de áreas de uso da terra.



**Figura 8.** Segregação espacial e estratificação social dos prazos imperiais da *Planta Koeler*, distribuídos em 1ª, 2ª, 3ª e 4ª classe.  
 Fonte: elaboração própria, adaptado de Julio Frederico Koeler (1846a).



**Figura 9.** Segregação espacial e estratificação social dos prazos imperiais da *Planta da Imperial Colonia de Petropolis (reduzida para guia dos visitantes)* - 1854, distribuídos em 1ª, 2ª, 3ª e 4ª classe.  
 Fonte: elaboração própria, adaptado de Otto Reimarus (1854).

#### 4.4 Exemplo da morfologia urbana das cidades de origem portuguesa e alemã e a imperial cidade de Petrópolis

Moudon (1997, pp. 3-5), aponta que o estudo da morfologia urbana é o estudo das cidades e nesse sentido é importante analisar desde a formação das cidades e suas transformações. No pensamento das três escolas: italiana, francesa e alemã é possível observar em comum os elementos de análise morfológica: as construções (edificações), os jardins, as ruas, monumentos, parques, prazos, entre outros.

No entanto, é no pensamento da escola alemã que se destaca a preocupação nos estudos das formas urbanas, a partir da criação de tipologias de formas urbanas históricas e posterior análise dos planos urbanos de diferentes períodos de uma mesma cidade.

O geógrafo alemão Michael Robert Günter Conzen, grande propulsor da escola alemã no estudo sobre a morfologia urbana, considera a paisagem urbana como dinâmica. Para a análise da paisagem urbana criou a abordagem denominada “análise do plano”, que permitiu identificar os três elementos do plano, sendo eles: as ruas, os prazos e as construções. Conzen destaca ainda a importância do estudo dos limites e dimensões dos prazos, isto é, as medições metrológicas, pois traduzirão a reconstrução a área inicialmente projetada.

No plano urbano de Petrópolis do século XIX implementado por Koeler e a partir da análise da paisagem urbana proposta por Conzen é possível identificar essas áreas homogêneas, traduzidas pelas quatro classes estabelecidas no relatório provincial de 1846 e os prazos traçados na *Planta Koeler*.

Ainda no que se refere a morfologia urbana, a cidade de Petrópolis apresenta uma peculiaridade, pois apesar do Brasil ter sido colônia portuguesa, a cidade de Petrópolis se destaca por ter sido pensada e executada a partir do Major de Engenheiros Julio Frederico Koeler, de origem alemã.

Alguns estudos pretéritos apresentam as características e peculiaridades das cidades portuguesas e alemãs em território brasileiro. Destaca-se o estudo de Peluso Júnior de 1956, *Tradição e plano urbano das cidades portuguesas e alemãs no Estado de Santa Catarina*, onde o autor faz uma comparação de quatro cidades do estado de Santa Catarina fundadas até meados do século XIX e observa dois tipos de plano urbano.

Segundo ele, o mais difundido plano urbano tem como elemento principal a praça central e a igreja como um ícone emoldurado, e o segundo, mais raro, que se adapta ao relevo para estabelecer e assentar os sítios, tendo como elemento principal o centro comercial. Em seu estudo, o autor destaca os planos urbanos as cidades de Florianópolis e Lages como exemplos do primeiro tipo de plano, sendo este um modelo de cidades portuguesas. E no segundo tipo de plano urbano as cidades de Joinville e Blumenau o padrão alemão de cidade (Peluso Júnior, 1956, p. 326).

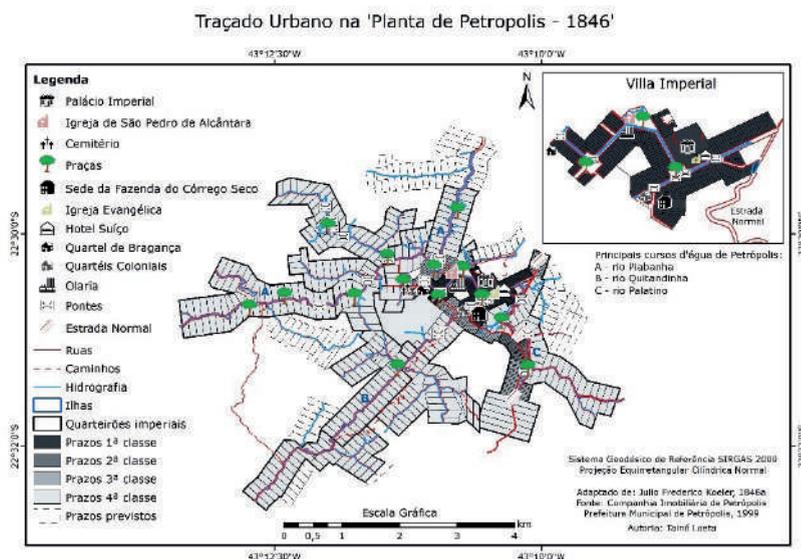
Nos núcleos de origem portuguesa, nas cidades de Florianópolis e Lages, as primeiras ruas adaptaram-se ao relevo, mas contando como ponto de referência para expansão da cidade a igreja com sua praça. Nesse sentido as ruas foram traçadas mais ou menos paralelas face a praça que se localizava de frente para o templo religioso, tornando esta área a zona central.

Já nas cidades de Blumenau e Joinville com origem de colonização alemã tinham como elemento principal a rua comercial. O relevo exerceu grande influência em seu traçado, mas também permitiu o traçado de quadras regulares em áreas mais planas.

No que tange a cidade de Petrópolis, observa-se similaridade com os elementos norteadores nos traçados das cidades de Blumenau e Joinville. A colonização da região Serrana e consequentemente a cidade de Petrópolis nasce da necessidade da abertura de um novo caminho para escoar a exploração aurífera proveniente das Minas Gerais com destino ao porto do Rio de Janeiro e que posteriormente seguia para Lisboa.

Desta maneira, a primeira correspondência de Petrópolis como as cidades de Blumenau e Joinville de colonização alemã era a função comercial, a primeira tinha como função porto fluvial e a segunda como porto marítimo para exportar a produção pecuária da colônia.

Outra similaridade além da função comercial era a direção dos arruamentos que se orientava pelo relevo. No que está relacionado ao traçado urbano de Petrópolis e os três principais cursos d'água, estes foram delineadores no processo de ocupação, pois Koeler traçou os prazos imperiais a partir das margens dos rios Piabanha, Quitandinha e Palatino e seus tributários, como pode ser evidenciado na Figura 10. Mesmo que o traçado urbano não seja regular de xadrez, apresenta uma certa regularidade no que diz respeito as dimensões dos prazos de acordo com a classe (tipo de uso) e com o frontispício de cada prazo voltado para o curso d'água.



**Figura 10.** Traçado urbano de Petrópolis delineado pelos três principais cursos d'água: Piabanha, Quitandinha e Palatino, e seus tributários.

Fonte: Laeta (2021).

## 5. Conclusão

Petrópolis nasce com alguns propósitos já estipulados, ou seja, não é uma cidade que nasce ao acaso. Conjunturas políticas, econômicas e sociais são pontos de partida para uma organização espacial ou reorganização espacial de Petrópolis, onde os momentos conturbados da Corte, tanto no que tange as questões políticas e econômicas contribuíram para o surgimento da cidade e que implicaram nas mudanças da dinâmica social criada na imperial cidade.

As terras da fazenda do Córrego Seco eram particulares do imperador, por isso muitas vezes há uma ligeira confusão na distinção do que é público e do que é privado. As orientações que se observa nos documentos normativos foram postas em prática muitas vezes transvestidas do papel a ser exercido pelos agentes sociais Estado e proprietários fundiários concentrados na figura do imperador.

Junto ao suposto “Estado”, aqui representado pelo próprio imperador, a classe dominante também contribui para o estabelecimento da segregação residencial e estratificação social, pois a ela é ofertado a escolha das melhores áreas para habitar.

Assim, nos limites estabelecidos pela *Planta Koeler*, os prazos da Villa Imperial, orientados pelos documentos históricos normativos, são ocupados por pessoas de alto poder aquisitivo, seja por pertencerem a Corte ou por proximidade com pessoas que pertencem a Corte, estabelecem uma segregação residencial e social.

A intensão não é produzir algo e por isso não há necessidade de prazos de grandes dimensões, mas sim ter sua moradia próximo a residência imperial. É a lógica da necessidade do *status* social.

Os mapas são documentos que permitem o registro das transformações espaciais de uma cidade, pois neles são inscritas as mudanças ocorridas na paisagem, tanto natural como construída. As plantas georreferenciadas possibilitaram uma sobreposição dos limites dos quarteirões e prazos imperiais, o que contribuiu para constatar as mudanças ocorridas no espaço geográfico da cidade imperial de Petrópolis, revelando uma maior expansão dos prazos referentes a 4ª classe, pertencentes aos nove novos quarteirões imperiais já na *Planta de Petropolis – 1850*, isto é, apenas quatro anos após a elaboração do primeiro documento histórico cartográfico da cidade, a *Planta Koeler*.

Como continuidade ao estudo do passado do espaço geográfico petropolitano, após o processo de georreferenciamento foram extraídos e espacializados os nomes geográficos (topônimos) dos cinco documentos históricos cartográficos. O objetivo deste próximo estudo é além de espacializar entender a origem e motivação dos nomes geográficos constantes nos referidos documentos históricos cartográficos para compreender melhor a dinâmica do processo de ocupação da cidade imperial de Petrópolis.

## Bibliografia

Ambrozio, J. C. G. (2012). O Território da Enfeiteuse e a Cidade de Petrópolis – RJ, Brasil. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*. Barcelona, 418 (39), 1-7.

- Azevedo, A. (1992). Vilas e Cidades no Brasil Colonial. Ensaio de geografia urbana retrospectiva. *Revista Terra Livre – AGB*, (10), 23-78.
- Dorling, D. & Fairbairn, D. (1997). *Mapping: Ways of Representation the World*, 1st edition. Edinburgh Gate: Prentice Hall.
- Fróes, G. K. (2002). *Algumas Datas Anteriores a 17 de Junho de 1859. Acervo Histórico Gabriel Kopke Fróes, 1953*. Instituto Histórico de Petrópolis.  
[http://www.ihp.org.br/lib\\_ihp/docs/gkf19530800.htm](http://www.ihp.org.br/lib_ihp/docs/gkf19530800.htm)
- Fróes, C. O. (2006). Petrópolis – A Saga de Um Caminho – O Caminho Novo (Capítulo 1). Tribuna de Petrópolis. Instituto Histórico de Petrópolis.  
[http://ihp.org.br/26072015/lib\\_ihp/docs/cof20060120.htm](http://ihp.org.br/26072015/lib_ihp/docs/cof20060120.htm)
- Geocart – Laboratório de Cartografia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (2015). Acervo fotográfico: tomada total e conjunto de 191 fotos da Planta de Petrópolis - 1846. Rio de Janeiro: Laboratório de Cartografia (GeoCart), Departamento de Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (2011). *Sinopse do Censo Demográfico 2010*. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Rio de Janeiro.
- Laeta, T. (2021). Cartografia histórica da imperial cidade de Petrópolis: subsídios para uma análise de geografia histórica no século XIX (1846-1861) [Tese, Departamento de Geografia, Instituto de Geociência, Universidade Federal do Rio de Janeiro], Rio de Janeiro.
- Lordeiro, M. S. (2005). *Petrópolis: rios e montanhas*. Petrópolis: Edição do Autor.
- Marques, M. S. (2001). *Cartografia Antiga: tabela de equivalências de medidas*. Lisboa: Biblioteca Nacional.
- Moudon, A. V. (1997). Urban Morphology as an Emerging Interdisciplinary Field. *Urban Morphology (International Seminar on Urban Form)*. Birmingham, vol. 1, pp. 3-10. ISSN: 1027-4278.
- Oliveira Junior, D. L. O. (1926) (Org.). *Legislação sobre os Municípios, Comarcas e Districtos – abrangendo o período de março de 1835 a 31 de dezembro de 1925*. Rio de Janeiro: Typ. Do Jornal do Commercio, de Rodrigues & C.
- Peluso Júnior, V. A. (1956). Tradição e Plano Urbano das Cidades Portuguesas e Alemãs. *Revista Boletim Geográfico*. Rio de Janeiro, XIV (133), 325-357.
- Santos, M. M. D. et al. (2011). *Capitania de Minas Gerais no Início dos Oitocentos, Segundo a Cartografia de Caetano Luiz de Miranda: informações fidedignas?* (pp. 267-300) Arquivos do Museu de História Natural. Belo Horizonte.
- Straforini, R. (2006). Estrada Reais no Século XVIII: a importância de um complexo sistema de circulação na produção territorial brasileiro. *Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 218 (33), 247-263.

## Fontes documentais

- Brasil (1843). Decreto Imperial, número 155 – referente ao arrendamento da Fazenda Corrego Secco ao Major de Engenheiros Julio Frederico Koeler na data de 16 de março de 1843. Archivo Publico Nacional – Rio de Janeiro.
- Brasil (1846). Lei nº 397, de 20 de maio de 1846. O presidente da província eleva a categoria de freguesia o curato de Petrópolis.  
[http://memoria.bn.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=094170\\_01&pesq=Petrópolis&pasta=ano%20184&hf=memoria.bn.br&pagfis=30021](http://memoria.bn.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=094170_01&pesq=Petrópolis&pasta=ano%20184&hf=memoria.bn.br&pagfis=30021)
- Brasil (1846). “Relatório do presidente da Província do Rio de Janeiro, o senador Aureliano de Sousa e Oliveira Coutinho, na abertura da Assembléa Legislativa Provincial no 1º de março de 1846, acompanhado do orçamento da receita e despesa

para o ano financeiro de 1846 a 1847. Nictheroy, em 1º de maio de 1846.”. Center of Research Libraries – Brazilian Government Document Digitalization Project. <http://brazil.crl.edu/bsd/bsd/776/000079.html>

Brasil (1857). Lei nº 961, de 29 de setembro de 1857. Decreta a elevação de cidade as vilas de Valença e Vassouras e a povoação de Petrópolis. <http://memoria.bn.br/DocReader/DocReader.aspx?bib=217280&pesq=Lei%20961&pasta=ano%20185&hf=memoria.bn.br&pagfis=13842>

## Documentos históricos

“Escritura de arrendamento da Fazenda denominada Corrego Seco, sita no alto da Serra da Estrella, que faz o Ex.<sup>mo</sup> Mordomo da Caza Imperial, ao Major de Engenheiros Julio Frederico Koeler” – na data de 26 de julho de 1843. Comissão do Centenário de Petrópolis – Prefeitura Municipal de Petrópolis (reprodução em foto-cópia do exemplar editado pela Tipografia Laemmert). Petrópolis: Tipografia Ipiranga, 1943a., 15 pp.

“Condições com que se aforão terras na Fazenda de Sua Majestade o Imperador, denominada <<Corrego Seco>> e que fazem parte do contracto de arrendamento que se faz o Sr. Major Koeler.” – na data de 26 de julho de 1843. Comissão do Centenário de Petrópolis, Prefeitura Municipal de Petrópolis (reprodução em foto-cópia do exemplar editado pela Tipografia Laemmert). Petrópolis: Tipografia Ipiranga, 1943a., 15 pp.

“Condições com que se aforão as terras de Petrópolis, e as do arrendamento do Major Julio Frederico Koeler.” – na data de 30 de julho de 1843. Comissão do Centenário de Petrópolis – Prefeitura Municipal de Petrópolis (reprodução em foto-cópia do exemplar editado pela Tipografia Laemmert). Petrópolis: Tipografia Ipiranga, 1943a., 15 pp.

## Documentos cartográficos

Planta de Petropolis – 1850. Rio de Janeiro: Biblioteca Nacional, 1850. Litografia desconhecida, 93,3 x 97,8 cm. [http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo\\_digital/div\\_cartografia/cart525848/cart525848.jpg](http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo_digital/div_cartografia/cart525848/cart525848.jpg)

Koeler, Julio Frederico. Planta de Petropolis – 1846. Petrópolis: Companhia Imobiliária de Petrópolis, 1846a. Litografia desconhecida, 128,9 x 128,2 cm. Escala gráfica de 500 brassas.

Koeler, Julio Frederico. Planta de Petropolis – 1846. Rio de Janeiro: Biblioteca Nacional, 1846b. Lithographia Vítor Larré, 61,5 x 65,85 cm. Escala gráfica de 600 Braças. Disponível em: [http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo\\_digital/div\\_cartografia/cart233811/cart233811.jpg](http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo_digital/div_cartografia/cart233811/cart233811.jpg)

Prefeitura Municipal De Petrópolis (Petrópolis). Base Cartográfica do Município de Petrópolis. Petrópolis: Secretaria de Planejamento e Urbanismo, 1999. Escala 1:10.000.

Reimarus, Otto. Planta da Imperial Colonia de Petropolis – reduzida para guia dos visitantes – 1854. Rio de Janeiro: Biblioteca Nacional, 1854. Lithographia. Imperial de Resenburg. 1854, 29,4 x 41,2 cm. Escala gráfica de 3.000 Braças. [http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo\\_digital/div\\_cartografia/cart176710/cart176710.jpg](http://objdigital.bn.br/objdigital2/acervo_digital/div_cartografia/cart176710/cart176710.jpg)

Taunay, Carlos Augusto. Imperial Cidade de Petropolis e os quarteirões coloniaes (planta reduzida) – 1861. Petrópolis: Arquivo Histórico do Museu Imperial, 1861, Ibram, MinC, nº 29/2017, SGI 1152/2017-07. Litografia desconhecida, 28 x 22 cm. Escala gráfica de 2.500 braças.

RESEÑAS





## Verdugo Chaura, Danilo (2022). *Ráster con Terra. Esto va de Filas, Columnas, Cotas y Píxeles*. Santiago, 741 pp.

[https://www.researchgate.net/publication/365801727\\_RasterconTerra](https://www.researchgate.net/publication/365801727_RasterconTerra)

Patricio Lamperein Polo<sup>1</sup>

El libro *Ráster con Terra* de Danilo Verdugo, autoeditado y dispuesto a la comunidad de manera libre y sin restricciones, surge como resultado de la extensa preparación de clases prácticas y teóricas del uso de la plataforma R a profesionales del área de las denominadas geociencias.

A lo largo de sus más de 700 páginas recorre las más variadas temáticas, tales como batimetría, geomorfometría, población, clima, análisis digital de imágenes y misiones espaciales, todo enfrentado desde la perspectiva de los datos en formato ráster y su uso con el lenguaje R, con casos prácticos y ejercicios, comenzando desde la instalación de aplicaciones, hasta aplicaciones avanzadas de clasificación de imágenes satelitales.

El libro se compone de nueve secciones principales: I Plataforma R, II Proyectos en R, Información Ráster, IV Geomorfometría, V Productos Cartográficos, VI Aplicación de Datos Ráster, VII Observación de la Tierra, VIII Misiones Espaciales y IX Aplicación.

*Plataforma R* presenta las herramientas informáticas, su historia, filosofía y aspectos técnicos básicos. Un extenso y detallado curso práctico acompaña los fundamentos teóricos.

*Proyectos R* nos muestra las mejores prácticas utilizando la herramienta informática, organizar los archivos, carpetas, datos y otros elementos de manera eficiente para desarrollar proyectos de largo plazo y extensión. También se detiene en los aspectos de sintaxis que facilitan dichas tareas.

*Información Ráster* trae una extensa discusión del formato de datos, como también detalladas descripciones de las operaciones básicas, manejos de sistema de coordenadas y como definir un área de estudio.

*Geomorfometría* se encarga de dar una extensa y detallada revisión a la ciencia encargada de estudiar la superficie terrestre y del fondo marino. Se estudian los pasos preliminares para descargar, preparar y organizar la información de cotas y pasa a una profunda descripción de los aspectos teóricos y prácticos del análisis de dicha información.

<sup>1</sup> Consultor Fuerza Aérea de Chile e independiente, Chile, correo electrónico: [patricio.lamperein.polo@gmail.com](mailto:patricio.lamperein.polo@gmail.com) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9899-4274>

*Productos Cartográficos* nos acompaña en el uso de los datos en formato ráster para la preparación, diseño y construcción de productos gráficos, desde mapas, pasando por gráficos tradicionales hasta mejoras estéticas. Se presentan casos de estudio reales.

*Aplicación de Datos Ráster* detalla el uso de información de Población y Clima, para la generación de productos gráficos, como estadísticos. Se detallan conceptos teóricos y prácticos para la descarga de datos tanto históricos como actuales, siempre considerando la calidad de ellos.

*Observación de la Tierra* se encarga de introducir al lector en los fundamentos de la teledetección espacial pasiva, una extensa discusión del espectro electromagnético, sus propiedades y fundamentos físicos son acompañados con ejercicios prácticos. A continuación, se pasa a una detallada descripción de los elementos básicos de clasificación de las imágenes satelitales, concepto de firma espectral y casos prácticos para descarga de datos y su uso mediante R.

*Misiones Espaciales* describe las principales misiones espaciales que proveen información gratuita de resolución media. Encontramos las misiones MODIS, Landsat y Sentinel, para cada una de ellas se describen las propiedades técnicas de los satélites, órbitas y otras propiedades operativas, como una detallada descripción de los sensores disponibles. Bandas, resoluciones, formato de los productos disponibles y donde conseguirlos son descritos en detalle y acompañados del código R para su uso y explotación. Se incluye un capítulo dedicado a la teledetección termal y sus usos prácticos.

*Aplicación* es la última sección del libro y en ella se analizan, describen y ejercitan las técnicas más comunes de procesamiento digital de imágenes. Temas tales como construcción de Mosaicos, modelamiento armónico (series temporales), uso de bandas, umbrales, índices espectrales y clasificación son tratados desde la perspectiva práctica usando los productos de las misiones espaciales descritas y el lenguaje R.

Para finalizar, el autor destaca que todo el texto, incluyendo el diseño, diagramación, manejo de ilustraciones, formato e impresión, ha sido realizado exclusivamente con las herramientas descritas en el mismo texto, mostrando con esto un caso real de la potencia y versatilidad del lenguaje R.

Solo resta indicar que la presente obra se convierte en uno de los textos de estudio más completo y extenso del tema en idioma español.

Vidal Solórzano Villegas, J. y Alejandro Perilla Suárez, G. (2022), *Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento*. Morelia, Editorial del Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental (CIGA), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) e Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt, 192 pp. ISBNs 978-607-30-6696-9 y 978-958-5183-55-1

Jean-François Mas<sup>1</sup>

Google Earth Engine (GEE) es una herramienta basada en la nube para el análisis científico y la visualización de datos geoespaciales. Combina un catálogo de varios petabytes de imágenes satelitales (Landsat, MODIS, Sentinel) y conjuntos de datos geoespaciales con capacidades de análisis a escala planetaria. Permite a científicos y desarrolladores detectar cambios, mapear tendencias y cuantificar diferentes procesos en la superficie de nuestro planeta utilizando una gran cantidad de datos (“big data”)

Amani *et al.* (2020) estudiaron 450 artículos de revistas publicados en 150 revistas entre enero de 2010 y mayo de 2020 derivados de estudios en los cuales se utilizó GEE. Estos autores observaron que GEE ha sido empleado en una amplia gama de aplicaciones, como la clasificación de cobertura/uso del suelo, hidrología, planificación urbana, desastres naturales, análisis climáticos y procesamiento de imágenes. La cantidad de publicaciones de GEE ha aumentado significativamente durante los últimos años y se espera que más usuarios de diferentes campos utilicen GEE para procesar “big data”.

Sin embargo, la documentación sobre GEE en español es aún incipiente y se limita a un nivel muy básico. En este contexto, el libro *Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento*, de Jonathan V. Solórzano Villegas y Gabriel A. Perilla Suárez viene a llenar este vacío.

La obra fue desarrollada en el ámbito de un proyecto del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento a la Enseñanza (PAPIME) de la Universidad Nacional Autónoma de México (<https://lae.ciga.unam.mx/proyectos/geomatica>) y es fruto de la colaboración entre el Instituto Humboldt (Colombia) y el Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental de la UNAM

<sup>1</sup> Laboratorio de Análisis Espacial, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), México, correo electrónico: [jfmas@ciga.unam.mx](mailto:jfmas@ciga.unam.mx). ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6138-9879>.

(México). A lo largo de doce capítulos, permite al lector sin ningún conocimiento previo alcanzar un nivel relativamente avanzado. El primer capítulo describe algunos aspectos generales de GEE, así como el propósito y la organización del libro. El segundo capítulo nos permite dar nuestros primeros pasos en GEE: describe el proceso de registro, la interfaz gráfica y la sintaxis del lenguaje de programación de la interfaz de programación de aplicaciones (API) de GEE.

Los tres capítulos siguientes muestran las funciones básicas para ayudar al usuario a interactuar con la API: El capítulo 3 (interfaz de usuario) muestra la interacción entre la consola y la pantalla de mapa, así como la creación de gráficos y la exportación de objetos desde GEE. El capítulo 4 nos enseña cómo importar datos a GEE como por ejemplo un marco que delimite el área de estudio. El capítulo 5 presenta los diferentes tipos de objetos que se pueden manejar dentro de GEE y nos explica las diferencias entre la programación del lado del servidor y del usuario.

A continuación, en cinco capítulos, se describen los tipos de objetos más comúnmente utilizados en GEE: 1) geometrías, 2) vectores, 3) colecciones de vectores, 4) imágenes y 5) colecciones de imágenes, así como los métodos más frecuentemente usados para manejar estos tipos de objeto.

En el capítulo 11, se describen algunos métodos más avanzados para procesar conjuntamente información vectorial y ráster incluyendo métodos geostatísticos como interpolaciones y kriging.

El último capítulo muestra los diferentes pasos para llevar a cabo la clasificación supervisada de una imagen multiespectral desde la selección de los campos de entrenamiento, la clasificación con varios algoritmos y la evaluación con base en una matriz de confusión.

La obra incluye el código de todos los ejemplos, permitiéndole al lector implementarlos directamente en línea. Además, contiene capturas de pantalla de los ejercicios, lo cual facilita el seguimiento de los mismos. El libro es por lo tanto el compañero ideal para un aprendizaje autónomo del manejo y análisis de datos espaciales con GEE. Es importante aclarar que esta obra no cubre todas las operaciones que pueden realizarse con GEE, como por ejemplo métodos basados en inteligencia artificial, análisis de series de tiempo, segmentación de imágenes o la creación de aplicaciones. Sin embargo, después de aprender las bases con este libro, el lector tendrá las herramientas para adquirir fácilmente un nivel de manejo más avanzado. Es también importante notar que la experiencia adquirida en el manejo de GEE facilitará mucho el aprendizaje de otros lenguajes y plataformas (por ejemplo, JavaScript o Python en Pangeo <https://pangeo.io/>).

## Bibliografía

Amani, M., Ghorbanian, A., Ahmadi, S.A., Kakooei, M., Moghimi, A., Mirmazloumi, S.M., Alizadeh Moghaddam, S.H., Mahdavi, S., Ghahremanloo, M. Parsian, S., Wu, Q. & B. Brisco (2020). Google Earth Engine Cloud Computing Platform for Remote Sensing Big Data Applications: A Comprehensive Review. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 13, 5326-5350. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3021052>

## Definición de la Revista

La *Revista Cartográfica* se publica desde 1952, es una publicación de la Comisión de Cartografía del Instituto Panamericano de Geografía e Historia un Organismo Especializado de los Estados Americanos (OEA).

El objetivo de la Revista es contribuir a la difusión del conocimiento en las áreas de cartografía, geodesia e información geográfica en general; promoviendo un enfoque que contribuya a compartir investigaciones, estudios y publicaciones en las áreas de conocimiento que son de interés para la revista.

La Revista publica artículos científicos (investigación, revisión y temáticos) y reseñas en los cuatro idiomas oficiales del IPGH (español, inglés, francés y portugués). Los artículos que se propongan para su publicación deberán ser originales y no estar publicados o propuestos para tal fin en otra revista.

Desde 2016 tiene una periodicidad semestral (enero-junio / julio-diciembre). La recepción de artículos está abierta permanentemente.

## Proceso de evaluación por pares

En atención a las buenas prácticas editoriales la *Revista Cartográfica* los artículos que cumplan los requisitos formales y de calidad serán evaluados por pares académicos externos a la institución editora. Se aplicará el sistema de evaluación "doble ciego".

## Secciones

### *Artículos:*

- Artículo de investigación: documentos que presentan resultados de nuevas investigaciones, u otras contribuciones originales que sean de aporte a las ciencias y disciplinas de interés para la Revista.
- Artículo de revisión: documentos que analicen, sistematicen e integren resultados de material ya publicado sobre un área del conocimiento, con el objeto de divulgar los avances y las tendencias de desarrollo en dicha área. Requiere una cuidadosa y rigurosa revisión bibliográfica del tema, un artículo de revisión no debería considerar menos de 60 referencias directas e indirectas. Solo para áreas de conocimiento de desarrollo muy reciente se consideran artículos de revisión con un número menor de referencias.
- Artículos temáticos: documentos que respondan a una convocatoria de la Revista para conformar un número temático coordinado por un destacado especialista como editor invitado.

### *Reseñas:*

Documentos que presentan un análisis crítico de libros u otras monografías que sean significativa para las ciencias y disciplinas de interés de la revista, que hayan sido publicados en los últimos tres años y que cuenten con ISBN. De forma excepcional se aceptarán reseñas de libros no actuales, clásicos, que sean significativos o de referencia para análisis y estudios actuales.

## Norma para autores

Los artículos y reseñas se enviarán únicamente en formato digital a través de este enlace <https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar>. Por lo tanto, es necesario que el autor este registrado de forma correcta y que disponga de usuario y contraseña.

Los archivos de texto se enviarán en formato Word, utilizando las plantillas correspondientes para que cada tipo de documento aceptado por la Revista.

Para asegurar la evaluación ciega del artículo, el archivo debe enviarse sin datos ni metadatos que permitan la identificación del autor. No se debe incluir nombre, afiliación, correo electrónico u organismo financiador en el documento. Estos datos se recogen de manera separada en la plataforma OJS, cuando se ingresan los metadatos del envío. Se solicita completar obligatoriamente los siguientes campos del formulario correspondiente a Autoría y colaboradores/as: Nombre/s y Apellido/s, contacto (e-mail), país, identificador ORCID y afiliación institucional.

Los documentos que no cumplan los requisitos de anonimato serán retirados del proceso de evaluación.

La revisión de los artículos incluye el uso de software antiplagio Ithenticate.

Los **Artículos** deberán tener una extensión máxima de 25 páginas, incluyendo figuras, tablas y bibliografía.

Las figuras y tablas deberán ubicarse dentro del texto. Las figuras se deben enviar por separado en formato JPG o PNG, con una resolución mínima de 300 dpi/ppp (o superior de acuerdo con el tamaño de la figura) sin compresión y a color. Para la impresión del número de la Revista se modificarán a escala de grises, siempre que no afecte la correcta comunicación de la información, en particular los mapas.

Las citas y referencias bibliográficas se harán según las Normas APA. Se recomienda el uso de gestores de referencias bibliográficas, como Zotero o Mendeley. Se debe incluir enlace DOI o enlace web en todos los casos que sea posible.

Las **reseñas** tendrán una extensión máxima de 8.000 caracteres con espacios incluidos.

Más información:

[www.revistasipgh.org/index.php/rcar/Directrices](https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/Directrices)

Evaluación de pares:

<https://www.revistasipgh.org/index.php/rcar/EvaluacionPares>

Dra. María Ester Gonzalez  
Editora  
Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía  
Universidad de Concepción  
Victoria 486-490, CP 4030000, Concepción, Chile  
Correos electrónicos:  
[editor\\_revista\\_cartografica@ipgh.org](mailto:editor_revista_cartografica@ipgh.org) | [mariaesgonzalez@udec.cl](mailto:mariaesgonzalez@udec.cl)

No se devolverá el material enviado.

### **Función editorial del Instituto Panamericano de Geografía e Historia**

El IPGH publica seis revistas, impresas y distribuidas desde México. Estas son: *Revista Cartográfica*, *Revista Geográfica*, *Revista Geofísica*, *Revista de Historia de América*, *Antropología Americana* y *Revista de Arqueología Americana*.

Se invita a todos los investigadores y profesionales de las áreas de interés del IPGH: cartografía, geografía, historia, geofísica y ciencias afines, a que presenten trabajos de investigación para que sean publicados en nuestras revistas científicas.

Si requiere mayor información, favor de comunicarse a:

Departamento de Publicaciones  
Secretaría General del IPGH  
Ex-Arzobispado 29, Colonia Observatorio, 11860 Ciudad de México, México  
Tels.: (+52-55) 5277-5888 / 5515-1910  
Correo electrónico: [publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org)

Edición del  
Instituto Panamericano de Geografía e Historia  
realizada en su Departamento de Comunicación Social,  
Ex Arzobispado núm. 29, Col. Observatorio  
11860, Ciudad de México, México  
Tels.: 5277-5791 / 5277-5888 / 5515-1910  
[publicaciones@ipgh.org](mailto:publicaciones@ipgh.org)  
2022

**ESTADOS MIEMBROS  
DEL  
INSTITUTO PANAMERICANO DE GEOGRAFÍA E HISTORIA**

**Argentina**

**Belice**

**Bolivia**

**Brasil**

**Chile**

**Colombia**

**Costa Rica**

**Ecuador**

**El Salvador**

**Estados  
Unidos  
de América**

**Guatemala**

**Haití**

**Honduras**

**México**

**Nicaragua**

**Panamá**

**Paraguay**

**Perú**

**República  
Dominicana**

**Uruguay**

**Venezuela**

**EL IPGH, SUS FUNCIONES Y SU ORGANIZACIÓN**

El Instituto Panamericano de Geografía e Historia (IPGH) fue fundado el 7 de febrero 1928 por resolución aprobada en la Sexta Conferencia Internacional Americana que se llevó a efecto en La Habana, Cuba. En 1930, el Gobierno de los Estados Unidos Mexicanos construyó para el uso del IPGH, el edificio de la calle Ex Arzobispado 29, Tacubaya, en la Ciudad de México.

En 1949, se firmó un convenio entre el Instituto y el Consejo de la Organización de los Estados Americanos y se constituyó en el primer organismo especializado de ella.

El *Estatuto Orgánico* del IPGH cita en su Capítulo II, artículo 2, su Misión:

1. Fomentar, coordinar y difundir los estudios pertenecientes a sus áreas de interés, las cuales son Cartografía, Geografía, Historia, Geofísica y las ciencias afines en beneficio de América;
2. Apoyar la iniciativa, innovación y generación de conocimiento en sus áreas de interés, a través de estudios, capacitaciones y trabajos de sus Comisiones;
3. Promover la cooperación interdisciplinaria entre los institutos de América y organizaciones internacionales afines.

Solamente los Estados Americanos pueden ser miembros del IPGH. Existe también la categoría de Observador Permanente, actualmente se encuentran bajo esta condición: España, Francia, Israel, Jamaica y República de Corea.

El IPGH se compone de los siguientes órganos panamericanos:

1. Asamblea General;
2. Autoridades;
3. Secretaría General; y
4. Comisiones.

Además, cada Estado Miembro designa y crea oficialmente una Sección Nacional, órgano establecido para el cumplimiento de la misión, visión y estrategia científica del IPGH en el ámbito nacional, contando para ello con el apoyo financiero de su gobierno.



Diseño y creación de una herramienta geotecnológica para el análisis de la accidentalidad vial en la Ciudad de Toluca, México *SIGSEV-TC José Miguel Muñoz y Raquel Hinojosa* • Dendrogeomorphology as a tool to depict hydrogeomorphic processes in the tropics *Adolfo Quesada-Roman* • Relaciones entre la estructura urbana y la movilidad cotidiana en Ciudad Juárez, Chihuahua, México *Isaac Chaparro Hernández* • Analyzing Segregation of Informal Residents in Latin American Cities' Periphery Using Remote Sensing *Sonia Morales* • Análisis espaciotemporal del proceso de pérdida forestal en los municipios de Charo, Hidalgo, Indaparapeo, Queréndaro y Zinapécuaro. Michoacán, México *Araceli Benítez Franco* • Los nuevos corredores en altura en la Ciudad de México. Análisis de su proceso, aplicación y visualización en un Sistema de Información Geográfica *Víctor Hugo Aquino Illescas* • A Cartografía histórica de Petrópolis e uma análise geográfica sincrônica para o século XIX (1846-1861) *Tainá Laeta, Manoel do Couto Fernandes y Mário Gonçalves Fernandes* • Ráster con Terra. Esto va de Filas, Columnas, Cotas y Píxeles *Patricio Lamperein Polo* • Cómo usar Google Earth Engine y no fallar en el intento *Jean-François Mas*

ISSN 0080-2085