

APLICACIONES GEOMÁTICAS EN EL ESTUDIO DE LA SUSTENTABILIDAD

Fabiola Doracely Yépez Rincón y Judith Ley García
(Coordinadoras)



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

APLICACIONES GEOMÁTICAS EN EL ESTUDIO DE LA SUSTENTABILIDAD

Fabiola Doracely Yépez Rincón y Judith Ley García
(Coordinadoras)



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Universidad Autónoma de Nuevo León

Dr. Santos Guzmán López

Rector

Dr. Juan Paura García

Secretario General

Dr. Ricardo González Alcorta

Director de la Facultad de Ingeniería Civil

APLICACIONES GEOMÁTICAS EN EL ESTUDIO DE LA SUSTENTABILIDAD

Fabiola Doracely Yépez Rincón y Judith Ley García
(Coordinadoras)

Universidad Autónoma de Nuevo León

Aplicaciones geomáticas en el estudio de la sustentabilidad [recurso electrónico] / Fabiola Doracely Yépez Rincón, Judith Ley García, coordinadoras. -- Universidad Autónoma de Nuevo León, 2024.

¹ recurso en línea

ISBN: 978-607-27-2346-7

¹ Geotecnología ambiental - Análisis. I. Yépez Rincón, Fabiola Doracely, coord. II. Ley García, Judith, coord. III. Universidad Autónoma de Nuevo León.

TD171.9 G46 2022

Aplicaciones geomáticas en el estudio de la sustentabilidad

© **D.R. 2024 Universidad Autónoma de Nuevo León**

Av. Universidad s/n, 4º piso de la Torre de Rectoría, Ciudad Universitaria,
San Nicolás de los Garza, Nuevo León, México. C.P. 66455

© **D.R. 2024 Fabiola Doracely Yépez Rincón y Judith Ley García**

Las características de esta publicación son propiedad de la
Universidad Autónoma de Nuevo León

Diseño editorial: Anakaren Lozano González

La imagen de la portada es proporcionada por el perfil *Pixabay* y la página *Pexels*,
y se utiliza bajo la licencia *Creative Commons Zero (CC0)*.

Nota de arbitraje: esta obra fue dictaminada por pares académicos.

ISBN de las entidades coeditoras

ISBN: 978-607-27-2346-7

Esta obra fue coordinada por los cuerpos académicos UANL-CA-080 y UABC-CA-115

ÍNDICE

SI. Estudio de los recursos naturales

Capítulo 1. Caracterización de series de tiempo de NDVI en bosques mexicanos vía análisis funcional de datos aplicado a imágenes de satélite

Inder Rafael Tecuapetla-Gómez, Berenice Fanny Galicia Gómez y Luis Francisco Rosales Marticorena

Capítulo 2. Número de observaciones sin nubes del acervo Sentinel-2 sobre las ecorregiones mexicanas entre 2015 y 2020

Jonathan V. Solórzano, Jean François Mas, Yan Gao y J. Alberto Gallardo-Cruz

Capítulo 3. Estado y tendencia de la degradación de Tierras en Ixtacamaxtitlán, Puebla, México

Itzel Arroyo Ortega, Rosalía Castelán Vega, Víctor Tamariz Flores, Eduardo Torres Ramírez y Virginia Cervantes Gutiérrez

Capítulo 4. Una propuesta Geo Big Data para cartografiar arrozales. El caso de la cuenca de la laguna Merín en territorio uruguayo

Giancarlo Alciaturi, María del Pilar García – Rodríguez y Virginia Fernández

SII. Estudios urbanos

Capítulo 5. Una aproximación a la calidad de vida intraurbana

Judith Ley García y Fabiola Maribel Denegri de Dios

Capítulo 6. Análisis geomorfológico – estructural de Chilpancingo Guerrero: marco de acciones resilientes ante riesgos geológicos

Jesús Alfonso Carreto Gutiérrez, Oscar Frausto Martínez y Alma Villaseñor Franco

Capítulo 7. Fotogrametría como metodología de monitoreo de daños en estructuras civiles por subsidencias, en la CDMX.

Gabriela Vidal García, Nelly Lucero Ramírez Serrato, Ana María Lizeth Caballero García, Mariana Patricia Jácome Paz, Graciela Herrera Zamarrón, Fabiola Doracely Yépez Rincón, Néstor López Valdés

Capítulo 8. Uso y aplicación de los SIG en la modelación de redes urbanas de distribución de agua.

Hugo Guerra Puente, Víctor Hugo Guerra Cobián, José Luis Bruster Flores, Adrián Leonardo Ferriño Fierro, Fabiola D. Yépez Rincón, Ricardo A. Cavazos González, Carlos Joel Ábrego Góngora

Capítulo 9. Valor ambiental-paisajístico del traspatio forestal en el centro de la ciudad de Jiquilpan de Juárez, Michoacán, México

Carlos Arredondo León

Introducción

En la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en Río de Janeiro, Brasil, en 1992 (Cumbre para la Tierra), aparece por primera vez la propuesta de adoptar mundialmente un modelo alternativo de desarrollo que tomara en cuenta la interdependencia entre factores económicos, sociales y ambientales (ONU, 1993). A partir de entonces, se entiende que la sustentabilidad es una característica del desarrollo de los países que permite la continuidad de la satisfacción de las necesidades humanas en la generación actual sin dañar o socavar los derechos que tendrán de satisfacer sus necesidades las generaciones futuras, lo que requiere de estrategias y acciones en materia de calidad de vida, protección del medio ambiente y preservación de los recursos naturales.

En este sentido, además de establecer algunos principios universales con respecto al desarrollo sustentable y el Programa 21, algunos de los resultados de la Cumbre para la Tierra fueron convenciones y convenios sobre el cambio climático, la diversidad biológica, la conservación de bosques y la desertificación. Sin embargo, hasta dos décadas después, en la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible (Río +20), se puso en marcha un proceso para desarrollar un conjunto de Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) que permitiera establecer los pasos a seguir en la implementación integral del modelo alternativo de desarrollo (ONU, 2012) y sustituir los Objetivos de Desarrollo del Milenio (ODM), que fueron concebidos con un alcance limitado y cuya vigencia estaba por concluir (ONU, 2000).

En el año 2015, la Asamblea General de Naciones Unidas reconoció que, a pesar de las acciones implementadas acorde a los ODM, el mundo contemporáneo seguía enfrentando enormes desafíos, pues tendían a intensificarse el crecimiento poblacional, las disparidades sociales, los riesgos para la salud y los desastres, así como el agotamiento de los recursos naturales y la degradación del medio ambiente. Por tal motivo, los países miembros aprobaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que consiste en “un plan de acción en favor de las personas, el planeta y la prosperidad” (ONU, 2015, p.1) y se operacionaliza a partir de 17 ODS y 169 metas conexas, que deben monitorearse en el tiempo para observar su grado de cumplimiento.

En el camino a la sustentabilidad y el logro de los ODS, uno de los retos que enfrentan las entidades gubernamentales, particularmente en los países en desarrollo, es contar con información relevante y oportuna que permita conocer el estado que guardan la población y los recursos naturales en sus territorios, así como dar cuenta de la evolución que presentan en ciertos periodos de tiempo. Ante esta necesidad, la geomática resulta una importante aliada, ya que brinda un amplio abanico de posibilidades de generación de conocimiento sobre el territorio en los distintos temas que constituyen la preocupación mundial actual en materia de desarrollo.

La geomática, concebida como “la integración sistémica de técnicas y metodologías de adquisición, almacenamiento, procesamiento, análisis, presentación y distribución de información geográficamente referenciada” (Aguirre, 2009, p.9), ha sido acogida por un

amplio abanico de disciplinas científicas que requieren, eventual o permanentemente, utilizar datos georreferenciados para indagar sobre distintos aspectos del territorio en cualquiera de sus escalas espaciales (p. ej. global, regional, nacional, local, urbana, intraurbana). Lo anterior, mediante los sistemas de posicionamiento global, la teledetección, la fotogrametría, la cartografía asistida por computadora, el análisis espacial y los sistemas de información geográfica, entre otros recursos informáticos y tecnológicos disponibles.

Desde esta lógica, la Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (SELPER) capítulo México, cuyo objetivo principal es promover actividades relacionadas con la percepción remota y las ciencias espaciales de modo que contribuyan con la comunidad y a la sustentabilidad del medio ambiente, convocó a sus miembros a presentar resultados de investigación en materia de sustentabilidad y ODS para formar la obra que aquí se presenta.

El libro Aplicaciones geomáticas en el estudio de la sustentabilidad reúne nueve textos, relacionados con el desarrollo sustentable, que indagan sobre distintos aspectos del territorio mexicano mediante la aplicación de diversas técnicas geoespaciales y aproximaciones disciplinarias. En su conjunto, los textos brindan un panorama que puede contribuir a una mejor comprensión de las realidades urbana y ambiental, aportando bases para una mayor profundización sobre los temas, así como elementos para el diseño de políticas públicas, en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Si bien, los ODS están interconectados entre sí, esta obra se centra en dos de ellos: El objetivo 15, conocido como Vida de ecosistemas terrestres, que busca "Proteger, restablecer y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, gestionar sosteniblemente los bosques, luchar contra la desertificación, detener e invertir la degradación de las tierras y detener la pérdida de biodiversidad". Y el objetivo 11, denominado Ciudades y comunidades sostenibles, el cual "pretende lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles" (ONU, 2015, p.16). A razón de lo anterior, la obra se estructura en dos secciones: estudio de los recursos naturales y estudios urbanos, con cuatro y cinco capítulos, respectivamente, cuyo contenido se describe en los párrafos subsecuentes.

En cuanto a los recursos naturales, en el primer capítulo, Inder Tecuapetla, Berenice Galicia y Luis Rosales, proponen un método exploratorio, basado en técnicas de teledetección, para caracterizar la cobertura espacial del ecosistema boscoso en México, mediante el monitoreo fenológico de la vegetación a partir de series de tiempo de un índice de vegetación.

En el segundo capítulo, Jonathan Solórzano, Jean F. Mas, Yan Gao y J. Alberto Gallardo implementan una metodología para analizar las capacidades reales que tienen los satélites de observación terrestre de proporcionar información de calidad sobre las ecorregiones mexicanas, identificando las ventanas de tiempo con datos efectivos de Sentinel-2 y los meses con mayor cantidad de imágenes despejadas.

En el tercer capítulo, Itzel Arroyo, Rosalía Castelán, Víctor Tamariz, Eduardo Torres y Virginia Cervantes, evalúan el estado y la tendencia de la degradación de tierra en un municipio de Ixtacamaxtitlán a partir de indicadores, generando información valiosa que puede ser considerada una línea de base para evitar, reducir y revertir este proceso.

En el cuarto capítulo, Giancarlo Alciaturi, María del Pilar García y Virginia Fernández proponen un método para la elaboración de cartografía de arrozales en la cuenca uruguaya de Laguna Merín, con el empleo de tecnologías Geo Big Data, que permiten el procesamiento de datos masivos que provienen de las misiones para la observación de la tierra.

En materia de estudios urbanos, en el quinto capítulo, Judith Ley y Fabiola Denegri analizan la calidad de vida en la ciudad de Mexicali, mediante un índice compuesto que incorpora una serie de indicadores ambientales y socioeconómicos a nivel manzana, identificando problemas de equidad en el desarrollo urbano que llevan a cuestionar el modelo de urbanización.

En el sexto capítulo, J. Alfonso Carreto, Oscar Frausto y Alma Villaseñor proponen el análisis geomorfológico estructural y técnicas geodésicas para la gestión de riesgos de origen geológico, su aplicación en la ciudad de Chilpancingo les permitió identificar las zonas de alto riesgo que pueden ser tomadas en cuenta en las acciones gubernamentales orientadas a la mitigación de desastres.

En el séptimo capítulo, Gabriela Vidal, Nelly Ramírez, Ana Caballero, Mariana Jácome, Graciela Herrera, Fabiola Yépez y Néstor López muestran la utilidad de las técnicas fotogramétricas en la generación de nubes de puntos 3D para detectar inclinaciones y agrietamientos de edificios a razón de la subsidencia en la Ciudad de México.

En el octavo capítulo, Hugo Guerra, Víctor Guerra, José Luis Bruster, Adrián Ferriño, Fabiola Yépez, Ricardo Cavazos y Carlos Ábrego, con el fin de reducir las pérdidas de agua por fugas, aplican una metodología con base SIG en el análisis de los distritos hidrométricos en un sector del Área Metropolitana de Monterrey.

En el noveno capítulo, Carlos Arredondo evalúa el valor ambiental y paisajístico de la vegetación de traspatio en el centro de la ciudad de Jiquilpan de Juárez, a partir de la elaboración de cartografías, obtenidas con la vectorización de un mosaico fotográfico, y el cálculo de indicadores de cobertura y composición de los remanentes.

REFERENCIAS

Aguirre, R. (2009). *Conceptos de Geomática y estudios de caso en México*. UNAM.

Organización de las Naciones Unidas (1993). *Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo* (volumen I). Naciones Unidas.

Organización de las Naciones Unidas (2000). *Declaración del Milenio*. Resolución A/RES/55/2, Naciones Unidas.

Organización de las Naciones Unidas (2012). Río +20. *Conferencia de las Naciones Unidas Sobre el Desarrollo Sostenible*. A/CONF.216/5*. Naciones Unidas.

Organización de las Naciones Unidas (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2020 para el Desarrollo Sostenible*. A/RES/70/1. Naciones Unidas.

I. SECCIÓN

**Estudio de los
recursos naturales**

Caracterización de series de tiempo de NVDI en bosques mexicanos vía análisis funcional de datos aplicado a imágenes de satélite

Inder Rafael Tecuapetla-Gómez ^{ab}

Berenice Fanny Galicia Gómez ^c

Luis Francisco Rosales Marticorena ^{de}

Investigadores por México Conahcyt ^a

Coordinación de Geomática de la Conabio ^b

Facultad de Ciencias de la UNAM ^c

Graduate School of Business, Universidad ESAN ^d

BREIN, BRECA Grupo ^e

La fenología de la vegetación es el estudio de la sincronización de los eventos estacionales (p. ej. el brote y la senescencia de las hojas) que se consideran el resultado de respuestas adaptativas a las limitaciones climáticas (Hmimina et al. (2013). Recientemente se ha incrementado el interés por estudiar, y hasta cierto punto, caracterizar, la estructura fenológica de la vegetación medida a través de productos derivados de imágenes satelitales.

Debido a su resolución espacial (250–500 m), algunos productos derivados de la misión Moderate Resolution Image Spectroradiometer (MODIS) han sido usados como insumos en estudios de la fenología de las hojas a escala global. Este tipo de estudios de la fenología global provee una estimación de agua, energía e intercambio de carbono entre la atmósfera y la biósfera a otras escalas. Por ejemplo, Zhang et al. (2003) presentaron una metodología que permite el monitoreo fenológico de la vegetación para áreas extensas a partir de series de tiempo de un índice de vegetación MODIS.

Más cercano al principio de caracterización del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI por sus siglas en inglés) considerado en este capítulo, Baumman et al. (2017) compararon las fechas de transición fenológica basadas en la fusión de imágenes Landsat y MODIS, y datos de cámaras terrestres de la red PhenoCam (Richardson et al., 2018) con el objetivo de describir la fenología de la hoja verde con una resolución espacial mucho más fina. Más recientemente, Kern et al. (2020) cuantificaron la duración del reverdecimiento de la fenología durante la primavera usando como base el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI, por sus siglas en inglés) en series de tiempo de 20 años de imágenes MODIS. Reyes-González et al. (2021) revisaron exhaustivamente la literatura científica publicada entre 2000 y 2018 relacionada con métodos de monitoreo cruzado para estimar la variación fenológica en diferentes ecosistemas en todo el mundo.

En este capítulo se propone un método para caracterizar la estructura del NDVI a partir de imágenes MODIS del periodo 2000–2016. El método propuesto recae en la aplicación de componentes principales funcionales para obtener un NDVI idealizado que se interpreta como la curva de NDVI que caracteriza el comportamiento común a todos los años registrados de cada píxel, es decir, el comportamiento intrínseco del píxel. Al estar basado en el análisis de componentes principales, el modelo propuesto es de tipo exploratorio. Hasta donde se tiene conocimiento, este modelo no ha sido explorado en la literatura de percepción remota y se busca iniciar una discusión al interior de esta comunidad de especialistas acerca de las futuras aplicaciones de esta metodología.

Los análisis estadísticos de este capítulo fueron efectuados en el lenguaje de programación R (R Core Team, 2023) y las rutinas están disponibles a través del paquete *sephora* v0.1.31 de Tecuapetla-Gómez (2024). Además del software, esta nota está complementada con visualizaciones de los estimadores de los siguientes parámetros fenológicos: reverdecimiento, inicio de temporada, madurez, senescencia, fin de temporada e hibernación.

Objetivo

Caracterizar la serie de tiempo de NDVI de 2000 a 2016 registrada sobre los bosques de coníferas de México, en el proceso, se provee de un novedoso modelo estadístico para extraer una señal intrínseca para cada píxel que permite, entre otras cosas, estimar algunos parámetros fenológicos.

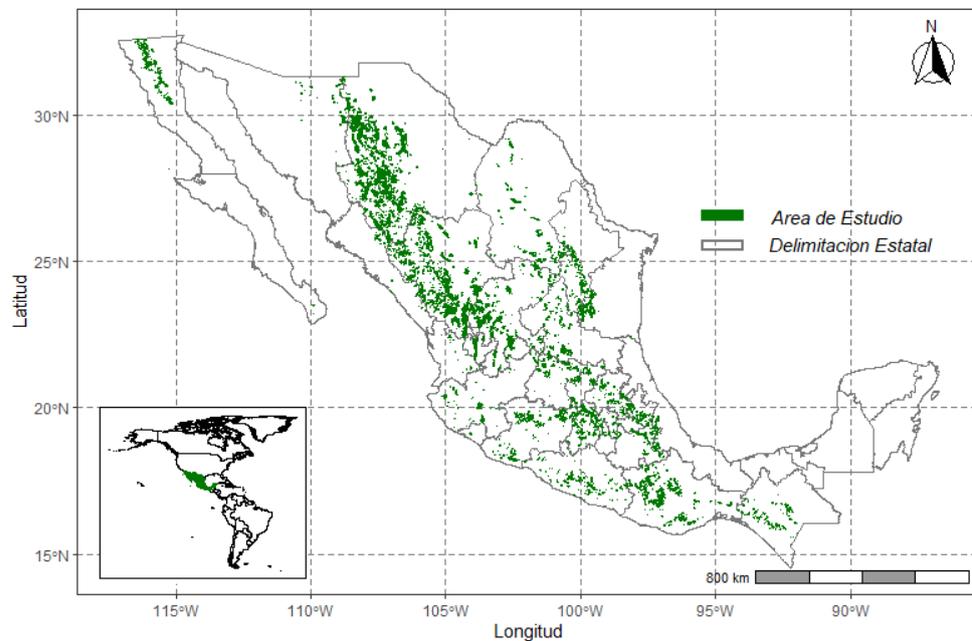
Área de estudio y materiales

El Sistema de Monitoreo del Cambio en la Cobertura del Suelo de América del Norte (NALCMS, por sus siglas en inglés) es una iniciativa de colaboración entre Canadá, Estados Unidos y México para el monitoreo de los cambios en la cobertura del suelo a lo largo del tiempo. Concebida en 2006 esta iniciativa subcontinental tiene como propósito proveer información que atienda simultáneamente las necesidades de mapeo de la cobertura del suelo, y proporcionar información para cada país con la intención de complementar programas nacionales de monitoreo existentes. NALCMS ha publicado mapas de cobertura del suelo de 2005 a 2020, actualizándolos cada cinco años (Commission for Environmental Cooperation, 2020.).

La región de interés de este trabajo está definida a través del polígono de la clase Bosque de Coníferas (temperate or sub-polar needleleaf forest, en la clasificación original) del mapa NALCMS 2010 para México (Figura 1).

Las series de tiempo del NDVI MOD13Q1 versión 6 con resolución temporal de 16 días y resolución espacial de 250 m fueron descargadas del repositorio LP DAAC de la NASA. El periodo de estudio fue de 2000 a 2016 generando una serie de tiempo de 391 imágenes. El análisis de la calidad de los datos de este acervo MODIS fue hecho con la metodología del software TiSeG de Colditz et al. (2008). El *shapefile* original del mapa NALCMS 2010 tiene una resolución de 30 m, por lo que se realizó el remuestreo pertinente produciendo 32 797 polígonos; pero la cantidad de píxeles por polígono no es constante.

Figura 1. Mapa del área de estudio.



Se empleó el *shapefile* de las ecoregiones terrestres de México, versión 2008, elaborado por el Instituto Nacional de Geografía y Estadística, la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, y el Instituto Nacional de Ecología (Inegi, Conabio & INE, 2008) como material auxiliar en la elaboración de visualizaciones para resumir algunos de los resultados de este trabajo.

Para extraer las series de tiempo del NDVI (por píxel) de cada polígono de los bosques de coníferas en México se integraron las 391 imágenes en una sola capa de tipo ráster *stack*, después se homologaron las propiedades espaciales del *shapefile* de la clasificación de bosques de coníferas y del ráster *stack* del NDVI y finalmente, el *shapefile* y el ráster *stack* fueron intersectados, produciendo el conjunto de datos analizado en este capítulo.

A continuación, y sin pérdida de generalidad, se detallan algunos aspectos de la metodología propuesta, utilizando como ejemplo un píxel del polígono 15 188 ubicado en el estado de Durango.

Análisis armónico

La metodología propuesta inicia con el ajuste del modelo de regresión armónica con cuatro frecuencias a las series de tiempo anuales de NDVI; esto está en línea con algunos estudios empíricos (p.ej. Eastman et al., 2009). El ajuste suaviza las observaciones originales y extrae la señal de (proxy) verdor proveniente del NDVI. Además, a partir del ajuste por regresión se obtiene una representación del NDVI como una combinación lineal de las funciones seno y coseno. Esta representación del NDVI como una función continua es útil para la estrategia final de modelación, la cual está basada en el análisis de componentes principales funcionales (ACPF).

En la Figura 2 se muestra el NDVI idealizado mediante el ACPF, en una línea sólida roja. En distintos colores se muestran las 17 series de tiempo de NDVI suavizadas vía regresión armónica para un píxel del polígono 15 188.

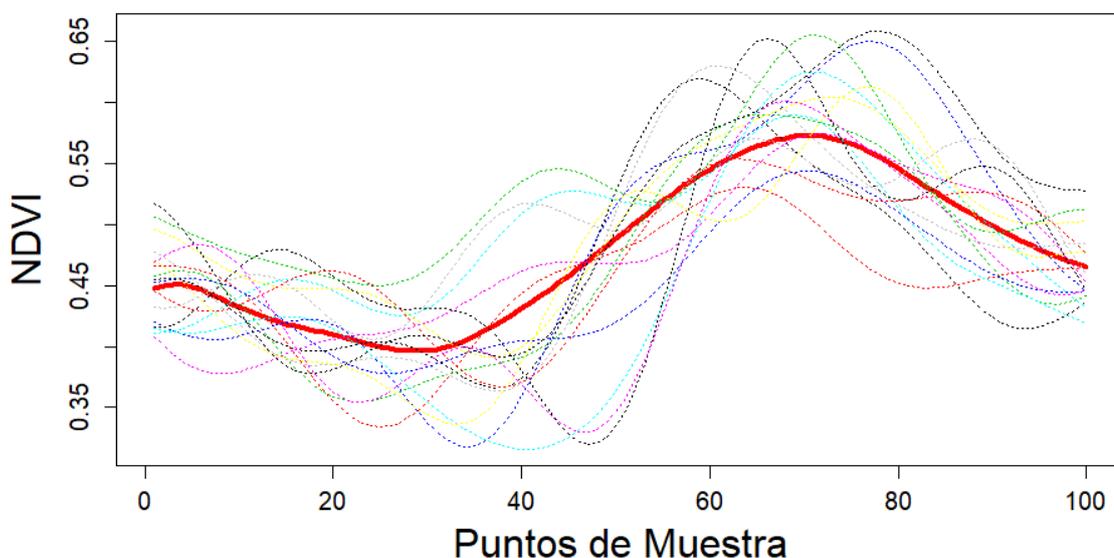
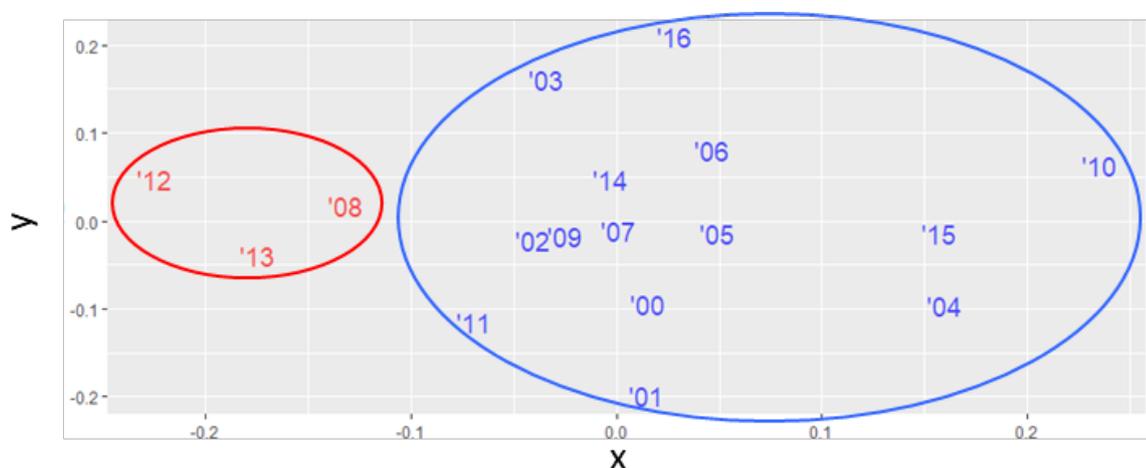


Figura 2. Gráfica de perfiles y NDVI.

Clustering jerárquico

Algunas series de tiempo anuales presentaron conductas atípicas, reflejando quizás fenómenos naturales ocurridos en esos años. Para generar grupos de series de tiempo con características similares, se aplicó la técnica conocida como *clustering* jerárquico (Sardá-Espinosa, 2017). Para la creación de los clústeres, se calculó una matriz de distancias que refleja la cercanía entre las series anuales. Una forma de visualizar el resultado de un *clustering* jerárquico es mediante la aplicación del clásico escalamiento multidimensional (Mardia y Riley, 2021), a la matriz de distancias entre series de tiempo (Figura 3).

Figura 3.
Escalamiento multidimensional sobre la matriz de distancias entre las 17 series de tiempo.



A partir de los resultados del *clustering* jerárquico, se definió una regla de asociación de datos para formar dos grupos. Si en un clúster hay más de 10 series de tiempo, entonces se usa el ACPF sobre ese conjunto. Si ninguno de los clústeres tiene más de 10 series de tiempo, entonces el ACPF se aplica en las 17 series de tiempo. Por ejemplo, en el píxel mostrado en las Figuras 2 y 3, los años 2000, 2003, 2004, 2006, 2007 y 2009 forman el clúster 1 y los años restantes forman el clúster 2. En este caso, el comportamiento intrínseco de este píxel se extraerá utilizando las curvas suavizadas de NDVI agrupadas en el clúster 2.

Lo expuesto hasta aquí está resumido en la Figura 4, donde se observan las seis etapas. Para los píxeles de los más de 30 000 polígonos analizados se requirió cómputo paralelo desde la etapa de Análisis armónico hasta la de Estimación de parámetros fenológicos.

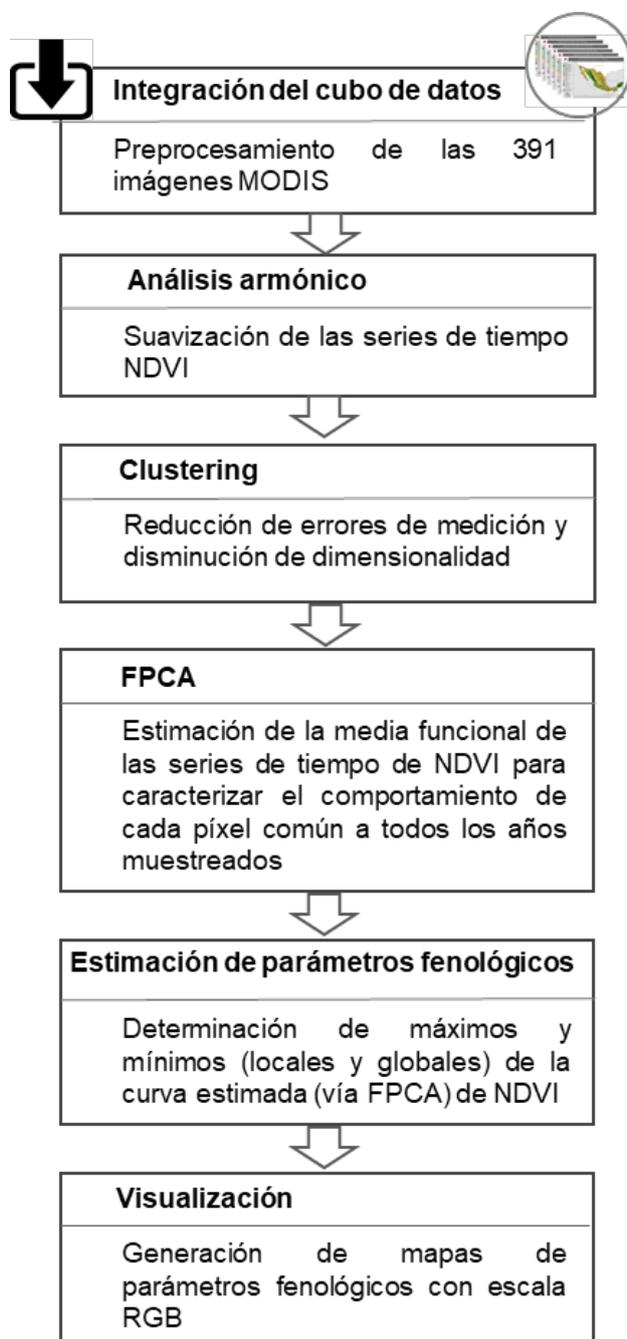
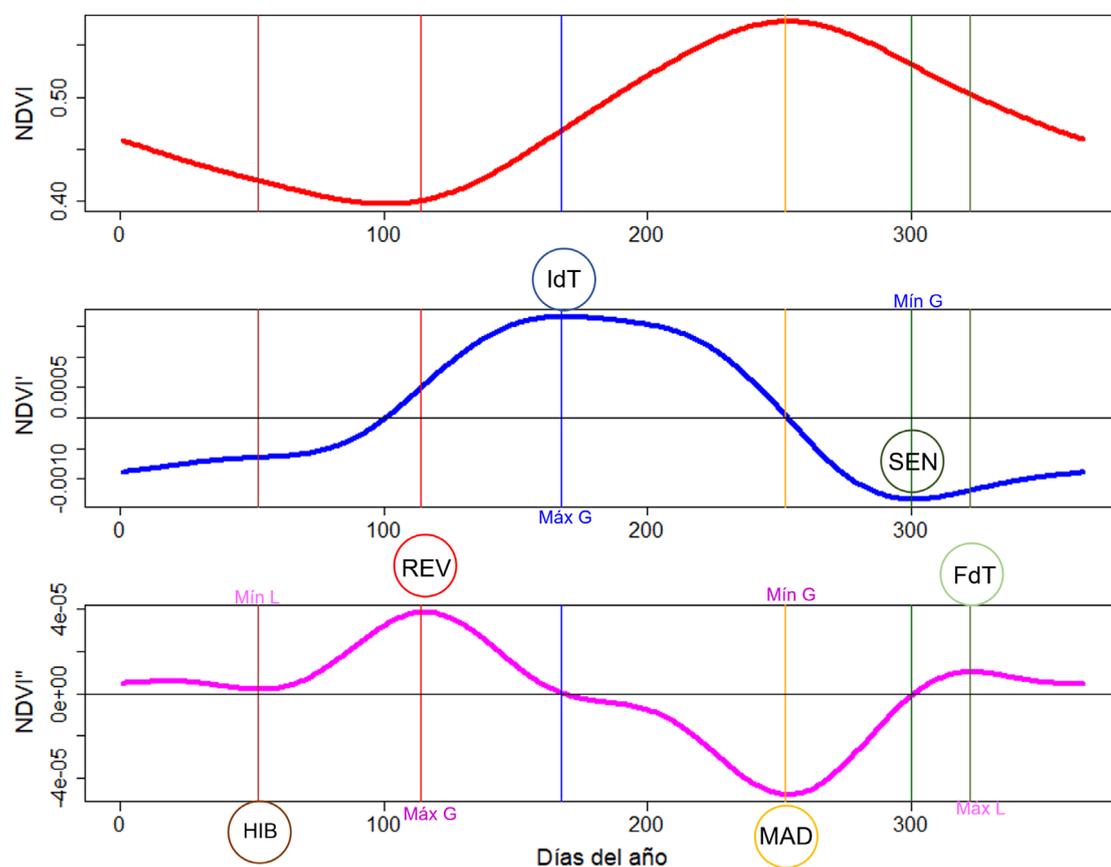


Figura 4. Esquema metodológico.

Análisis de componentes principales funcionales

En principio, el ACPF es una técnica de reducción de datos que busca describir una muestra de datos funcionales en términos de un subconjunto reducido de componentes no correlacionados entre sí (Kokoszka & Reimherr, 2017). Por lo tanto, la técnica es útil para reducir la dimensión original de los datos, aunque con una pérdida de información marginal, de modo que cada elemento de la muestra (curva) se puede expresar como una combinación de los componentes principales (Figura 5).

Figura 5.
Parámetros
fenológicos
estimados sobre
la curva idealizada
de NDVI.



En esta investigación se utiliza el ACPF considerando que el proceso generador de datos del NDVI tiene carácter funcional para cada píxel. En este sentido, se cuenta con muestras funcionales (anuales) de NDVI, obtenidas a través del análisis armónico descrito anteriormente.

Cada elemento muestral (curva suavizada) es representado por una combinación de elementos de la base de componentes principales funcionales, de manera que es posible estimar simultáneamente la media poblacional y sus desviaciones individuales funcionales. En esta nota, el estimador de esta media poblacional es considerado como un NDVI idealizado, véase la Figura 2 para tener un ejemplo de esta idea.

De manera más formal, se denota el proceso estocástico funcional de NDVI para un píxel determinado como $F = \{f(x); x \in [0,1]\}$ con media $\tau(x)$ y kernel de covarianza $K(x,z) = \{cov(f(x), f(z)); x, z \in [0,1]\}$. Si se recolectan muestras del proceso como curvas anuales de NDVI, es posible representar cada elemento de la muestra como:

$$f_j(x) \approx \tau(x) + \sum_{k=1}^h \epsilon_k(x) v_{jk} + \epsilon_j; \epsilon_j \sim N(0, R)$$

Donde $\epsilon_k(x)$ es el k -ésimo componente principal funcional, v_{jk} es el coeficiente correspondiente al k -ésimo componente principal funcional asociado a la observación j , h es un número entero y ϵ_j es un ruido aleatorio cuya distribución se supone normal (o Gaussiana) con matriz de covarianza R . La ecuación se deriva directamente de la aplicación del lema de Mercer y la expansión Karhunen-Love, y con ella se refiere a un modelo de componentes principales funcionales. En las aplicaciones de este capítulo se utilizó el valor $h=3$.

Note que, en la ecuación, la función $\tau(x)$ es la media funcional de la muestra, y en este trabajo se ha interpretado como la curva de NDVI que caracteriza el comportamiento de cada píxel común a todos los años muestreados, es decir, el comportamiento intrínseco del píxel. Los detalles del algoritmo de estimación se pueden encontrar en Krivobokova et al. (2022).

Estimación de parámetros fenológicos

A partir de la curva idealizada del NDVI obtenida a través de ACPF, se calcularon los siguientes parámetros fenológicos:

- **(Rev) Reverdecimiento:** el punto en el tiempo en donde la segunda derivada del NDVI idealizado alcanza su máximo.
- **(IdT) Inicio de temporada:** máximo global de la primera derivada del NDVI idealizado.
- **(Mad) Madurez:** el mínimo local de la segunda derivada del NDVI idealizado.
- **(Sen) Senescencia:** el mínimo local de la segunda derivada del NDVI idealizado.
- **(FdT) Fin de temporada:** el mínimo global de la primera derivada del NDVI idealizado.
- **(Hib) Hibernación:** el máximo local de la segunda derivada del NDVI idealizado.

La definición de estos parámetros está basada en Bauman et al. (2016). La Figura 5 ejemplifica estas definiciones de modo visual.

Resultados

La metodología descrita anteriormente, y resumida en la Figura 4, se aplicó a cada píxel de los 32 797 polígonos analizados en este trabajo; el uso de cómputo en paralelo resultó crucial para completar esta tarea de modo eficiente. Se obtuvieron seis rásteres (uno para cada parámetro fenológico estimado:). Adicionalmente, se obtuvieron seis rásteres por cada parámetro fenológico estimado (Rev, IdT, Mad, Sen, FdT y Hib).

Se consideró que la utilización de los polígonos de las ecorregiones de México: California Mediterránea (CM), Sierras Templadas (ST) y Desiertos de América del Norte (DAN) y Elevaciones Semiáridas Meridionales contribuye a visualizar mejor nuestros resultados. La Tabla 1 resume la distribución espacial de las seis fechas fenológicas (en días del año) con respecto de las ecorregiones recién mencionadas.

Tabla 1. Superficie ocupada por cada ecorregión.

Fecha	CM	ST	DAN
Rev	177 (74)	125 (46)	130 (42)
IdT	241 (81)	175 (37)	176 (32)
Mad	234 (117)	217 (40)	221 (35)
Sen	157 (130)	251 (96)	244 (106)
Fdt	132 (69)	87 (88)	90 (93)
Hib	135 (69)	157 (146)	145 (144)

Adicionalmente, en este trabajo se realizó el cálculo de las anomalías estandarizadas (estudentización de parámetros), como estrategia para visualizar espacialmente los seis parámetros y describir posibles relaciones entre ellos. Posteriormente, se mapearon los parámetros estandarizados en la escala RGB (0,255). Con los rásteres en RGB se produjeron visualizaciones RGB en formato estándar, como la que se muestra en la Figura 6, donde se observan los parámetros Rev, IdT y Mad sobre la ecorregión California Mediterránea, colocados en las bandas del rojo, verde y azul, respectivamente.

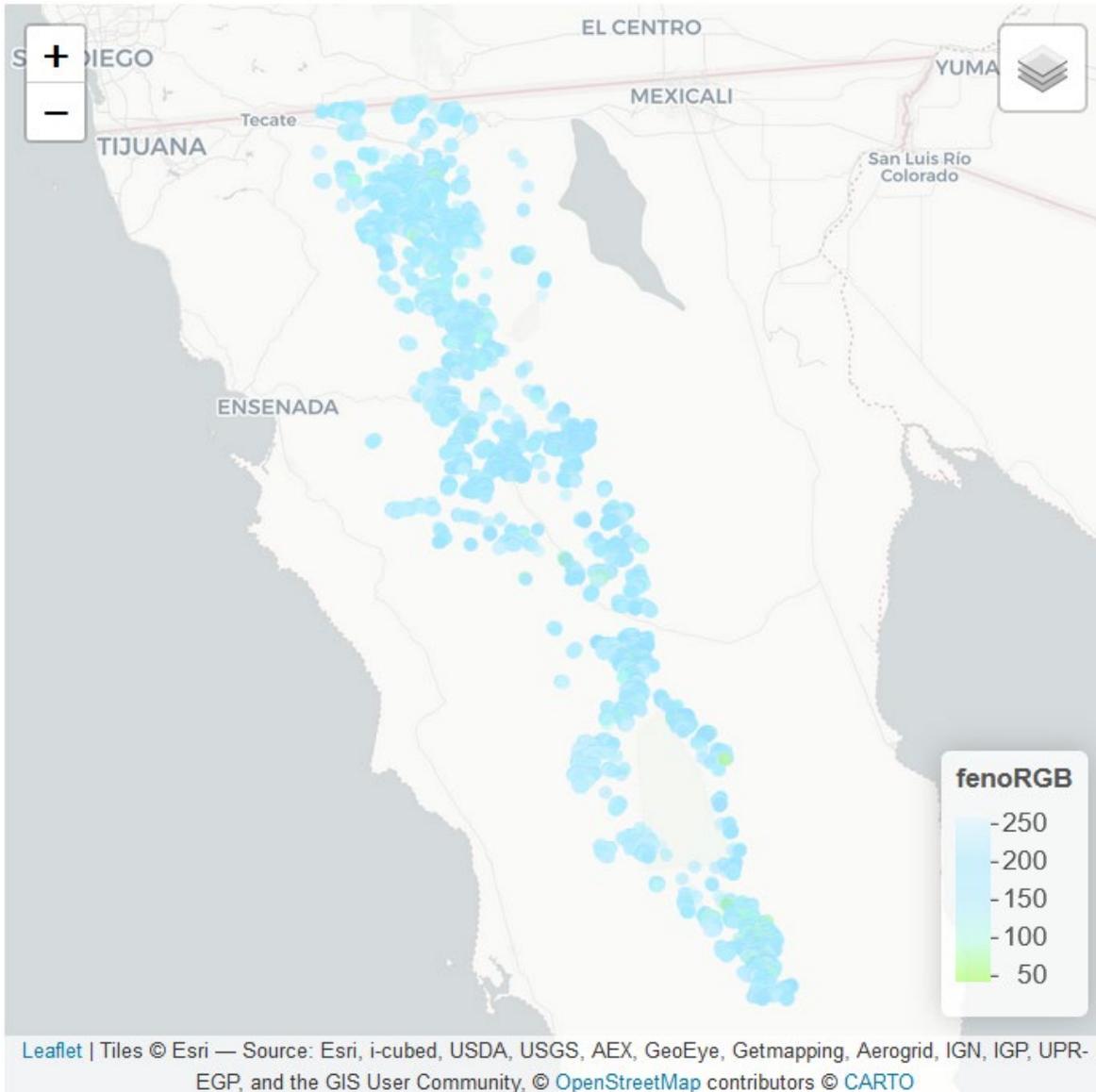


Figura 6. Visualización RGB de las fechas fenológicas en la ecorregión California Mediterránea.

Discusión y conclusión

Según muestran los resultados, la desviación estándar de algunos de los parámetros estimados es grande. Posiblemente un análisis posterior, a nivel polígono, contribuya a disminuir la desviación estándar en algunas regiones, lo que permitirá tener estimaciones más precisas.

En los resultados es evidente que la forma de la curva fenológica en los píxeles de la ecorregión California Mediterránea es distinta a las derivadas de las otras dos ecorregiones bajo consideración. Por ejemplo, comparando el resultado de las Sierras y los Desiertos de América del Norte, los estimadores de Rev, IdT, Mad y Sen muestran una coherencia cronológica. Sobre los parámetros FdT e Hib, se sugiere considerar los estimadores mostrados en este trabajo como días julianos del siguiente año.

Existe una dispersión de las distribuciones de IdT y de Mad, las cuales son similares y cercanas al límite superior de sus escalas. La mayoría de los píxeles de la figura anterior muestran un color resultante de la combinación predominante de los colores verde y azul. Esto correspondería al hecho de que los valores estimados de IdT y Mad son más grandes que los de Rev, en congruencia con un ciclo fenológico canónico.

Estos resultados son cualitativamente similares a los obtenidos a partir de la visualización del mapa RGB sobre las Sierras Templadas, los Desiertos de América del Norte y las Elevaciones Semiáridas Meridionales, por tanto, no se incluyeron como figuras en este documento.

La visualización RGB de los parámetros Sen, FdT e Hib sobre la California Mediterránea y las Sierras Templadas producen resultados cualitativamente distintos. Por ejemplo, en el primer caso, en ciertos polígonos existe una dispersión marcada en los parámetros FdT e Hib y esta es superior a la dispersión en el parámetro Sen. Mientras que, en el segundo caso, aparentemente la dispersión en Sen y FdT es considerablemente mayor a aquella en Hib. Por su parte, la dispersión Mad y Sen es similar y significativamente mayor a la de Rev e Hib tanto en las Sierras Templadas como en los Desiertos de América del Norte y las Elevaciones Semiáridas Meridionales.

En conclusión, la metodología presentada en esta nota es de tipo exploratoria. A partir de su aplicación sobre una gran cantidad de polígonos heterogéneos, se considera que los estimadores obtenidos para el reverdecimiento, el inicio de la temporada, la madurez y la senescencia (con excepción de California Mediterránea) presentan resultados cronológicamente sensibles.

Además de los estudios focalizados, se continuará investigando la pertinencia del modelo de componentes principales para datos de Observación de la Tierra. En particular, al grupo de investigadores le interesa generar estrategias automatizadas para determinar el número óptimo de componentes. Otro tema de particular interés consiste en incorporar la aparente heterogeneidad del NDVI en la estimación de las curvas suavizadas de NDVI.

Referencias

- Appelhans, Tim; Detsch, F., Reudenbach, C., & Woellauer, S. (2023). *Mapview:Interactive Viewing of Spatial Data in R*. <https://CRAN.R-project.org/package=mapview>.
- Baumann, M., Ozdogan, M. Richardson, A.D., & Radeloff, V.C. (2017). Phenology from Landsat When Data Is Scarce: Using MODIS and Dynamic Time-Warping to Combine Multi-Year Landsat Imagery to Derive Annual Phenology Curves. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 54, 72–83. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2016.09.005>
- Colditz, R.R., Conrad, C., Wehrmann, T., Schmidt, M., & Dech, S. (2008). TiSeG: A Flexible Software Tool for Time-Series Generation of MODIS Data Utilizing the Quality Assessment Science Data Set. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 46(10), 3296–3308.
- Commission for Environmental Cooperation. (2020). *North American Land Change Monitoring System*. <https://storymaps.arcgis.com/collections/c6ec1f9a8199450283557e21eef481b1?item=3>.
- Eastman, R.J., Sangermano, F., Ghimire, B., Zhu, H., Chen, H., Neeti N., Cai, Y., Machado, E.A., & Crema, S.C. (2009). Seasonal Trend Analysis of Image Time Series. *International Journal of Remote Sensing*, 30(10), 2721–2726. <https://doi.org/10.1080/01431160902755338>
- Hmimina, G., Dufrêne, E., Pontailier, J-Y., Delpierre, N., Aubinet, M., Caquet, B., de Grandcourt, A., , urban, B., Flechard, C., Granier, A., Gross, P., Heinesch, B., Longdoz, B., Moureaux, C., Ourcival, J.-M., Rambal, S., Saint André, L., & Soudani, K. (2013). Evaluation of the Potential of MODIS Satellite Data to Predict Vegetation Phenology in Different Biomes: An Investigation Using Ground-Based NDVI Measurements. *Remote Sensing of Environment*, 132(15),145–58. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.01.010>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, & Instituto Nacional de Ecología. (2008). *Ecorregiones Terrestres de México (2008)*. Conabio. <http://geoportal.conabio.gob.mx/metadatos/doc/html/ecort08gw.html>.
- Kern, A., Marjanović, H., & Barcza, Z. (2020). Spring Vegetation Green-up Dynamics in Central Europe Based on 20-Year Long MODIS NDVI Data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287(15), 107969. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107969>
- Kokoszka, P. & Reimherr, M. (2017). *Introduction to Functional Data Analysis*. CRC Press.
- Krivobokova, T., Serra, P., Rosales, F., & Klockmann, K. (2022). Joint Non-Parametric Estimation of Mean and Auto-Covariances for Gaussian Processes. *Computational Statistics & Data Analysis*, 173, 107519. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2022.107519>
- Mardia, K.V, & Riley, A.D. (2021). The Classical Multidimensional Scaling Revisited. *arXiv*, arXiv:2112.14503. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2112.14503>
- R Core Team. (2023). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing. <https://www.R-project.org/>
- Reyes-González, E.R., Gómez-Mendoza, L., Barradas, V.L., & Terán-Cuevas, Á.R. (2021). Cross-Scale Phenological Monitoring in Forest Ecosystems: A Content-Analysis-Based Review. *International Journal of Biometeorology*, 65, 2215–2227. <https://doi.org/10.1007/s00484-021-02173-2>

Richardson, A.D., Hufkens, K., Milliman, T., Aubrecht, D.M., Chen, M., Gray, J.M., Johnston, M.R., Keenan, T.F., Klosterman, S.T., Kosmala, M., Melaas, E.K., Friedl, M.A., & Froking, S. (2018). Tracking Vegetation Phenology Across Diverse North American Biomes Using PhenoCam Imagery. *Scientific Data*, 5(1), 1–24. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.28>

Sardá-Espinosa, A. (2017). *Comparing Time-Series Clustering Algorithms in r Using the Dtwclust Package*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:2232315>

Tecuapetla-Gomez, I. (2024). *Sephora: Statistical Estimation of Phenological Parameters*. <https://CRAN.R-project.org/package=sephora>.

Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.F.C., Gao, F., Reed, B.C., & Huete, A. (2003). Monitoring Vegetation Phenology Using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84(3), 471–75. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)

Número de observaciones sin nubes del acervo sentinel-2 sobre las ecorregiones mexicanas entre 2015 y 2020

Jonathan V. Solórzano ^a

Jean François Mas ^a

Yan Gao ^a

J. Alberto Gallardo-Cruz ^b

Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental,
Universidad Nacional Autónoma de México, Morelia, México ^a

Centro Transdisciplinar Universitario para la Sustentabilidad,
Universidad Iberoamericana Ciudad de México ^b

Actualmente, el estudio de la superficie terrestre mediante sensores remotos constituye una herramienta fundamental para una variedad enorme de aplicaciones realizadas a diferentes escalas espaciotemporales (Cohen & Goward, 2004; Melesse et al., 2007). Por ello, esta es un área en constante desarrollo, en la que continuamente se amplían las capacidades de los sensores para estudiar la superficie terrestre (Boyd & Danson, 2005; Zhu et al., 2017). Entre estas nuevas misiones, aquellas que ofrecen imágenes de manera gratuita consisten en los acervos de mayor demanda, ya que no ofrecen una restricción económica para su uso.

Sentinel-2 es la misión de imágenes multiespectrales del programa de la agencia espacial europea que comenzó operaciones en 2015 (European Space Agency [ESA], 2020; Malenovský et al., 2012). En comparación con misiones previas gratuitas, como Landsat, presenta una mayor resolución espacial (bandas de 10, 20 y 60 m), así como una mayor resolución temporal (tiempo de revisita entre 3 y 4 días) y espectral (bandas sensibles al borde del rojo y a un infrarrojo estrecho). Por ello, este acervo de imágenes promete convertirse en uno de los más utilizados en el futuro (Malenovský et al., 2012).

La misión Sentinel-2 se creó con el objetivo de ayudar al monitoreo de la superficie terrestre y de mares interiores (Drusch et al., 2012). Por ello, dichas imágenes se han utilizado para estudiar: cuerpos de agua continentales, bosques, incendios, infraestructura urbana, entre otras cosas (Caballero et al., 2020; Lima et al., 2019; Pesaresi et al., 2016; Roteta et al., 2019).

A pesar de que el acervo Sentinel-2 permite obtener un mayor número de observaciones de la superficie terrestre y con mayor resolución espectral y espacial que sensores anteriores, se desconocen sus capacidades reales para estudiar la superficie terrestre de un área de interés. Esto se debe a que las condiciones de nubosidad impiden el registro de la reflectancia de la superficie (Coluzzi et al., 2018). En este sentido, conocer el número de observaciones despejadas de un acervo de imágenes ayudará a determinar las ventanas temporales en las que se pueden obtener observaciones de la superficie terrestre y evaluar su compatibilidad con las escalas temporales y espaciales de algún fenómeno de interés (Whitcraft et al., 2015; Wulder et al., 2019).

Objetivo

El presente estudio tuvo el objetivo de analizar el número de observaciones sin nubes a nivel de píxel del acervo de imágenes multiespectrales Sentinel-2 para el territorio mexicano entre 2015 y 2020. Este trabajo constó de una actualización de la evaluación previamente realizada para el periodo 2015 – 2019 (Solórzano et al., 2020).

Método

Debido a que el país tiene una gran heterogeneidad de características climáticas y ambientales, las cuales determinan las condiciones predominantes de nubosidad, este se dividió en siete ecorregiones: California Mediterránea, Desiertos de América del Norte, Elevaciones Semiáridas Meridionales, Grandes Planicies, Selvas Cálido Húmedas, Selvas Cálidos Secas y Sierras Templadas. Estas correspondieron a las ecorregiones nivel I propuestas por Inegi et al. (2008) que se muestran en la Figura 1 y Tabla 1.

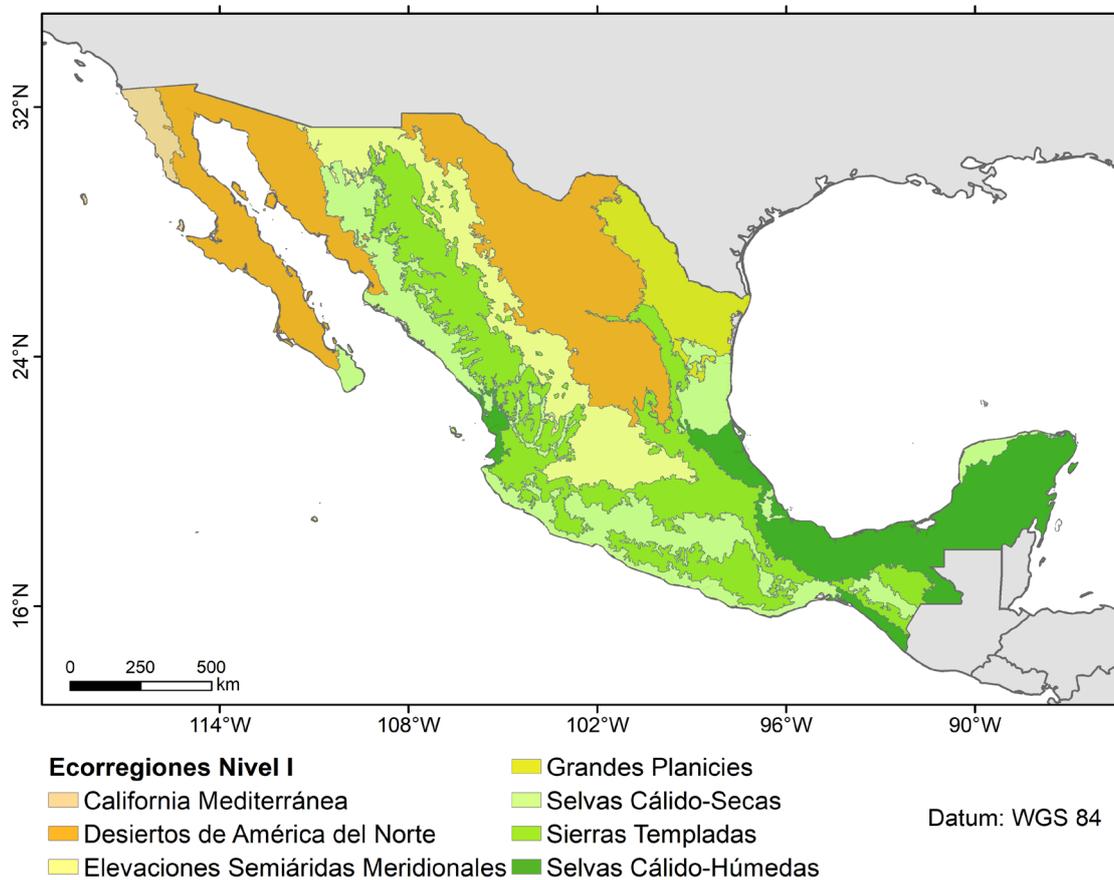


Figura 1. Área de estudio.

Tabla 1. Superficie ocupada por cada ecorregión.

Ecorregión	Superficie (Km ²)
California Mediterránea	25 086
Desiertos de América del Norte	559 147
Elevaciones Semiáridas Meridionales	229 851
Glandes Planicies	107 674
Selvas Cálido Húmedas	277 255
Selvas Cálido Secas	319 891
Sierras Templadas	433 881

Fuente: Inegi et al. (2008).

Debido a que el análisis requiere de consultar un enorme número de imágenes, se utilizó la interfase de programación de la aplicación o *Application Programming Interface* (API) de Javascript de Google Earth Engine (Gorelick et al., 2017). Al presente, existen dos colecciones de imágenes Sentinel-2 disponibles en dicha API, la colección 1C (reflectancia en la superficie de la atmósfera, *top of atmosphere*) y la 2A (reflectancia debajo de la atmósfera, *bottom of atmosphere*). Aunque la segunda es la colección de mayor calidad y grado de procesamiento, las primeras imágenes de esta colección datan de 2017 para el territorio mexicano, las imágenes más antiguas son de diciembre de 2018 (Google Earth Engine [GEE], 2020). Por el contrario, las primeras imágenes de la colección 1C datan de julio de 2015, muy cercanas a la fecha del lanzamiento del primer satélite Sentinel-2A. Por esta razón se utilizó la primera para realizar los análisis.

Las imágenes de Sentinel-2 se distribuyen en escenas llamadas gránulos (*granules*) de 110 x 110 km. En el caso de México, un total de 303 gránulos cubren la totalidad de su superficie terrestre (ESA, 2020). Estos gránulos se sobreponen entre ellos en franjas de 10 km, en un sentido tanto vertical como horizontal. Como consecuencia, para obtener el número real de observaciones sin nubes hay que contar una sola vez las observaciones presentes en estas franjas.

Para conocer el número de observaciones disponibles de la colección 1C, se utilizó la banda QA60, la cual contiene la evaluación de la calidad de los píxeles, es decir, si los píxeles de la imagen corresponden a nubes o a sombras de nubes (ESA, 2020). De acuerdo con esta banda, se enmascararon los píxeles indicados como nubes o sombras y se transformó el valor de las observaciones sin nubes al día juliano de la fecha del registro (p.ej. 1-365). Por último, se calculó el número de fechas distintas por píxel para conocer la cantidad de observaciones despejadas.

Una vez obtenido la cantidad de observaciones, se procedió a resumirlas por ecorregión, obteniendo la frecuencia de píxeles por el número de observaciones sin nubes. Estas se calcularon en intervalos mensuales y anuales para el periodo 2015-2020.

Resultados

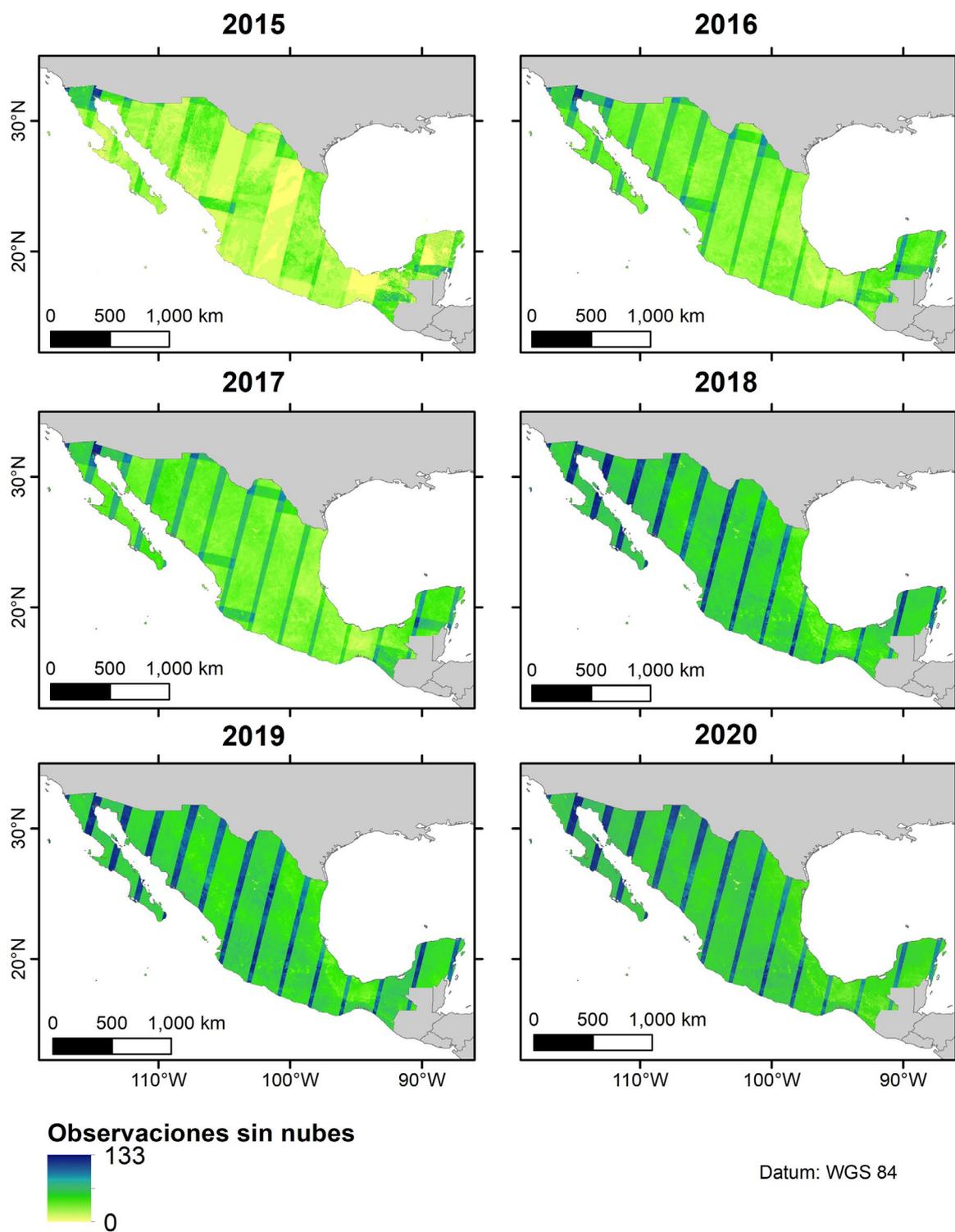
Los resultados mostraron que el número de observaciones anuales por píxel se encuentran entre 0 y 133, y entre 0 y 13, en intervalos mensuales. Sin embargo, estos resultados presentaron un patrón heterogéneo tanto en el tiempo como en el espacio.

Las primeras observaciones disponibles de Sentinel-2 para el territorio mexicano datan de agosto de 2015, un par de meses después de que el satélite Sentinel-2A comenzara operaciones. A partir de esta fecha, se observa un aumento paulatino en el número de observaciones disponibles gracias al incremento en las capacidades de funcionamiento de la misión (ESA, 2016). El segundo aumento en el número de observaciones se aprecia en 2017, tras el lanzamiento del Sentinel-2B (ESA, 2018). Desde entonces, aumentaron las capacidades de funcionamiento de la misión y en 2018 se observa a la misión en su capacidad completa. Por ello, el número de observaciones despejadas anuales se encuentra entre 0 y 17 en 2015, entre 0 y 55 en 2016, entre 0 y 88 en 2017, entre 0 y 119 en 2018, entre 0 y 121 en 2019 y, por último, entre 0 y 133 en 2020. Además, el número de observaciones despejadas promedio por píxel sigue el mismo patrón, ya que en 2015 correspondió a 0.45, en 2016, a 1.26, en 2017, a 2.18, en 2018, a 4.44, en 2019, a 4.72 y en 2020, a 5.05.

Al analizar los resultados por porcentaje de superficie se observó que 2015 es el único año donde no se obtuvo por lo menos una observación para el 95 % del territorio, lo cual es un criterio comúnmente utilizado para clasificar imágenes como de alta calidad (Whitcraft et al., 2015). Por el contrario, en todos los demás años (2016-2020), se obtuvo por lo menos una observación despejada para prácticamente todo el territorio (Figura 2). Estos resultados indican que potencialmente se podría construir un mosaico anual para casi todo el país a partir de 2016.

Cabe mencionar que debido a la órbita de los satélites que transportan a los sensores Sentinel-2, en la captura de la información se pueden observar franjas de entre 30 y 70 km de ancho que presentan casi el doble de observaciones con respecto a las áreas aledañas. Estas franjas representan áreas con gran potencial para ser estudiadas con las imágenes Sentinel-2 y equivalen aproximadamente a un 20 % de la superficie terrestre nacional. En contraposición, la mayoría del territorio presenta entre 0 y 71 observaciones (Figura 2).

Figura 2. Distribución espacial del número de observaciones despejadas por año en el territorio mexicano en el periodo 2015 – 2020.



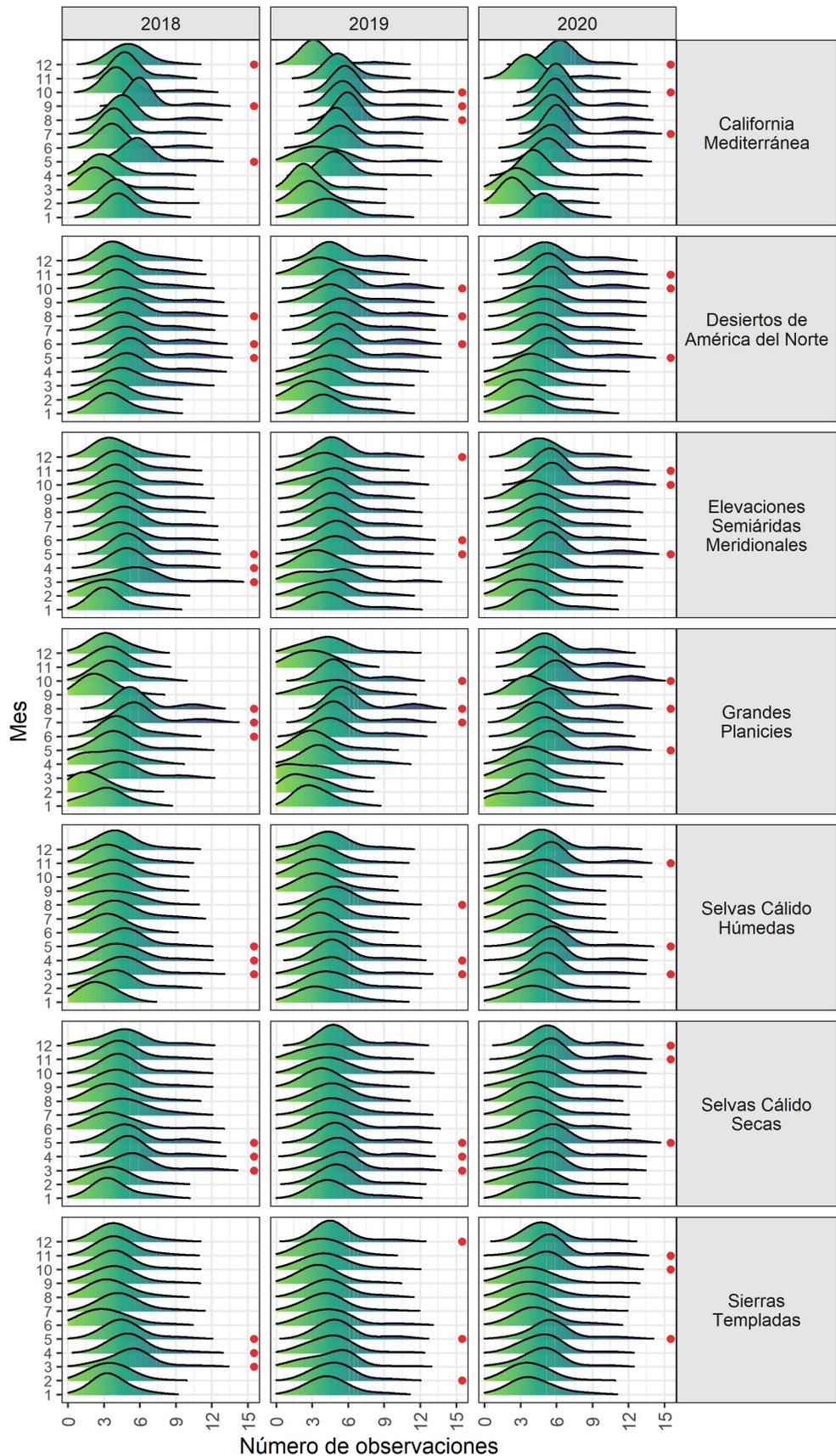
Al analizar los patrones de las observaciones por ecorregiones, se observó que las más secas, como California Mediterránea y Desiertos de América del Norte, presentaron un mayor número de observaciones, en comparación con las ecorregiones más húmedas, como Sierras Templadas o Selvas Cálido Húmedas. Esto evidentemente responde a las condiciones de nubosidad de cada una de estas ecorregiones (Figura 3). A pesar de ello, sin importar la ecorregión, en el periodo de máximo funcionamiento de la misión Sentinel-2 (p.ej. 2018-2020), el valor de observaciones promedio por mes tuvo un valor mínimo de 1.84 y un máximo de 6.96 (Tabla 2). Por otro lado, en el periodo 2015-2017 el número de observaciones promedio por mes se encontró entre 0 y 4.56 (Tabla 2).

Ecorregión	2015 <i>mín</i>	2017 <i>máx</i>	2018 <i>mín</i>	2020 <i>máx</i>
California Mediterránea	0	4.49	2.73	6.63
Desiertos de América del Norte	0.02	4.35	3.18	6.41
Elevaciones Semiáridas Meridionales	0	4.36	3.42	6.38
Glandes Planicies	0	3.16	1.84	6.96
Selvas Cálido Húmedas	0	3.27	2.56	5.85
Selvas Cálido Secas	0	4.32	3.69	6.2
Sierras Templadas	0	4.11	3.30	5.82

Tabla 2. Valores mínimos y máximos del número de observaciones mensuales promedio en el periodo inicial (2015-2017) y de funcionamiento máximo de la misión Sentinel-2 (2018-2020).

Para la gran mayoría de las ecorregiones, el periodo con mayor número de observaciones sin nubes correspondió a la época de secas (p.ej. marzo-mayo u octubre-diciembre), con excepción de California Mediterránea y Grandes Planicies donde se concentró, en algunos años, en junio-septiembre (Figura 3). En estos periodos de menor nubosidad de 2018 a 2020, se podría obtener por lo menos una observación despejada para el 95 % de la superficie de cada ecorregión, utilizando observaciones de un solo mes, lo que permitiría minimizar la variación estacional entre los píxeles. Cabe aclarar que, en la Figura 3, los puntos rojos indican los tres meses donde se obtuvo el mayor número de observaciones promedio por píxel.

Figura 3. Distribución de la frecuencia del número de observaciones sin nubes por mes, año y ecorregión durante el periodo de máximo funcionamiento de la misión Sentinel-2 (2018-2020).



Discusión y conclusión

En este trabajo se utilizó la colección Sentinel-2 1C, en lugar de la 2A, ya que contiene el acervo más longevo. Sin embargo, estudios previos han reportado que la banda de evaluación de la calidad de esta colección contiene algunos errores, sobre todo en zonas de alta humedad o suelos muy claros (Coluzzi et al., 2018; Solórzano et al., 2020). Por esta razón, se recomienda que, si el periodo de interés es posterior al 2018, se utilice mejor la colección 2A, la cual contiene información de mayor calidad para delinear nubes y sombras que incluyen bandas de SCL (*Simple Classification Map*), así como una banda de probabilidad de correspondencia a una nube.

En cuanto a las imágenes de años anteriores a 2018, solo podrían ser utilizadas las imágenes 1C, descargándolas y procesándolas de manera local con el algoritmo 'Sen2Cor' para así obtener la imagen en nivel 2A (Main-Knorn et al., 2017). Además, recientemente, en Google Earth Engine está disponible una colección de imágenes con la probabilidad de presencia de nubes en cada píxel, la cual tiene el mismo periodo de imágenes que la colección 1C, permitiendo refinar el enmascaramiento de nubes. Dado este escenario, es probable que el número de observaciones sin nubes reportado en este trabajo haya sido levemente sobrestimado o subestimado, dependiendo de la región. Por ejemplo, en Selvas Cálido Húmedas se pudo haber sobreestimado, debido a la falta de una correcta identificación de nubes; mientras que, en Desiertos de América del Norte, se pudo haber subestimado debido a la confusión de sustratos muy claros con nubes.

Los periodos de menor nubosidad por ecorregión se calcularon de acuerdo con las observaciones disponibles de Sentinel-2; sin embargo, estos se definieron a partir de las observaciones del periodo de 2018-2020. Por lo tanto, este tipo de estimaciones podrían realizarse con mayor precisión utilizando acervos más longevos, como los de MODIS o Landsat (Justice et al., 2002; Wulder et al., 2019), ya que permiten incorporar mejor la variación inter e intraanual de los patrones de nubosidad.

Por último, la misión Sentinel-2 está planeada para que continúe con los sensores Sentinel-2C y Sentinel-2D, los cuales se pondrán en órbita en 2024 y 2025, respectivamente (ESA, 2020). Tras estos lanzamientos, se espera que la misión funcione por lo menos hasta el 2032, para contar con un acervo de aproximadamente 16 años.

Como conclusión se puede mencionar que este estudio permitió identificar el potencial de las imágenes Sentinel-2 para estudiar la superficie terrestre mexicana. Los resultados de la evaluación mostraron que, aunque existen imágenes Sentinel-2 desde el 2015, realmente a partir de las imágenes de 2016 se puede obtener un mosaico sin nubes para el 95 % del territorio en ventanas anuales, y a partir de 2018, en determinadas ventanas mensuales. Por otro lado, se observó que los meses con mayor número de observaciones despejadas varían por ecorregión, pero tienden a concentrarse en tres periodos: marzo-mayo, junio-septiembre y octubre-diciembre. Estos resultados ayudarán a determinar el potencial real de utilizar este acervo de imágenes para estudiar distintos fenómenos de la cobertura terrestre mexicana y a tomar decisiones sobre las ventanas temporales a utilizar para obtener mosaicos sin nubes. Finalmente, se espera que los algoritmos de detección de nubes de Sentinel-2 continúen mejorando en un futuro, lo cual permitirá mejorar la calidad de los estudios que utilicen estas imágenes.

Referencias

- Boyd, D. S., & Danson, F. M. (2005). Satellite remote sensing of forest resources: three decades of research development. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 29(1), 1-26. <https://doi.org/10.1191/0309133305pp432ra>
- Caballero, I., Fernández, R., Escalante, O. M., Mamán, L., & Navarro, G. (2020). New capabilities of Sentinel-2A/B satellites combined with in situ data for monitoring small harmful algal blooms in complex coastal waters. *Scientific Reports*, 10(1), 1-14. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65600-1>
- Cohen, W. B., & Goward, S. N. (2004). Landsat's Role in Ecological Applications of Remote Sensing. *BioScience*, 54(6), 535-545. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0535:LR IEAO\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0535:LR IEAO]2.0.CO;2)
- Coluzzi, R., Imbrenda, V., Lanfredi, M., & Simoniello, T. (2018). A first assessment of the Sentinel-2 Level 1-C cloud mask product to support informed surface analyses. *Remote Sensing of Environment*, 217, 426-443. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.08.009>
- Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., . . . Bargellini, P. (2012). Sentinel-2: ESA's Optical High-Resolution Mission for GMES Operational Services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>
- European Space Agency. (2016). *Sentinel Data Access Annual Report*. <https://sentinel.esa.int/documents/247904/2955773/Sentinel-Data-Access-Annual-Report-2016>
- European Space Agency. (2018). *Sentinel Data Access Annual Report*. <https://sentinel.copernicus.eu/web/sentinel/news/-/article/2018-sentinel-data-access-annual-report>
- European Space Agency. (2020). *Sentinel-2 MSI User Guide*. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>
- Google Earth Engine. (2020). *Sentinel-2 MSI: MultiSpectral Instrument, Level-2A*. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, & Instituto Nacional de Ecología. (Inegi, Conabio e INE). (2008). *Ecorregiones terrestres de México 1:1000000*. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- Justice, C.O., Townshend, J., Vermote, E., Ed, M., Wolfe, R., Saleous, N., . . . Morisette, J. (2002). An overview of MODIS Land data processing and product status. *Remote Sensing of Environment*, 83, 3-15. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00084-6](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00084-6)
- Lima, T. A., Beuchle, R., Langner, A., Grecchi, R. C., Griess, V. C., & Achard, F. (2019). Comparing Sentinel-2 MSI and Landsat 8 OLI Imagery for Monitoring Selective Logging in the Brazilian Amazon. *Remote Sensing*, 11(8), 961. <https://doi.org/10.3390/rs11080961>
- Main-Knorn, M., Pflug, B., Louis, J., Debaecker, V., Müller-Wilm, U., & Gascon, F. (2017). Sen2Cor for Sentinel-2. En *Proceedings SPIE 10427*, Image and Signal Processing for Remote Sensing XXIII, 1042704. <https://doi.org/10.1117/12.2278218>

Malenovský, Z., Rott, H., Cihlar, J., Schaepman, M. E., García-Santos, G., Fernandes, R., & Berger, M. (2012). Sentinels for science: Potential of Sentinel-1, -2, and -3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. *Remote Sensing of Environment*, *120*, 91-101. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.026>

Melesse, A. M., Weng, Q., Thenkabail, P. S., & Senay, G. B. (2007). Remote Sensing Sensors and Applications in Environmental Resources Mapping and Modelling. *Sensors*, *7*, 3209-3241. <https://doi.org/10.3390/s7123209>

Pesaresi, M., Corbane, C., Julea, A., Florczyk, A. J., Syrris, V., & Soille, P. (2016). Assessment of the added-value of sentinel-2 for detecting built-up areas. *Remote Sensing*, *8*(4). <https://doi.org/10.3390/rs8040299>

Roteta, E., Bastarrika, A., Padilla, M., Storm, T., & Chuvieco, E. (2019). Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: Generation of a small fire database for sub-Saharan Africa. *Remote Sensing of Environment*, *222*, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.12.011>

Solórzano, J. V., Mas, J. F., Gao, Y., & Gallardo-Cruz, J. A. (2020). Patrones espaciotemporales de las observaciones de Sentinel-2 a nivel de imagen y píxel sobre el territorio mexicano entre 2015 y 2019. *Revista de Teledetección*, *56* (Número especial), 103-115. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.14044>

Whitcraft, A. K., Becker-Reshef, I., & Justice, C. O. (2015). A framework for defining spatially explicit earth observation requirements for a global agricultural monitoring initiative (GEOGLAM). *Remote Sensing*, *7*, 1461-1481. <https://doi.org/10.3390/rs70201461>

Wulder, M. A., Loveland, T. R., Roy, D. P., Crawford, C. J., Masek, J. G., Woodcock, C. E., . . . Zhu, Z. (2019). Current status of Landsat program, science, and applications. *Remote Sensing of Environment*, *225*, 127-147. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.015>

Zhu, L., Suomalainen, J., Liu, J., Hyyppä, J., Kaartinen, H., & Haggren, H. (2017). A Review: Remote Sensing Sensors. En R.B. Rostamov, S. Hasanova & M. H. Zeynalova (Eds.), *Multi-purposeful Application of Geospatial Data*. InTechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.71049>

Estado y tendencia de la degradación de tierras en Ixtacamaxtitlán, Puebla, México

Itzel Arroyo Ortega ^a

Rosalía Castelán Vega ^b

Víctor Tamariz Flores ^b

Eduardo Torres Ramírez ^b

Virginia Cervantes Gutiérrez ^c

Instituto de Ecología, A.C.-CEIBAAS ^a

Instituto de Ciencias. Benemérita
Universidad Autónoma de Puebla ^b

Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco ^c

La degradación de las tierras (DT) es una problemática ambiental relevante a nivel mundial (Overpeck et al., 2013; United Nations Convention to Combat Desertification [UNCCD], 2016), que produce efectos negativos en el ambiente, la economía y la sociedad (Al Sayah et al., 2019; Grainger, 2015). Para contrarrestar esta situación, la Asamblea General de la Organización de las Naciones Unidas incorporó el concepto de Neutralidad en la Degradación de las Tierras (NDT), cuyo propósito es evitar o reducir la nueva degradación y revertir la degradación pasada a través de la restauración, la rehabilitación y la gestión del uso de la tierra (Orr et al., 2017).

En este contexto, la NDT se estima mediante la aplicación de un marco científico-conceptual realizado por la Convención de las Naciones Unidas para la Lucha contra la Desertificación (UNCCD, por sus siglas en inglés), aplicable a diferentes escalas (Orr et al., 2017; UNCCD, 2018). En este marco se propone la evaluación de la degradación por medio de tres indicadores: Cubierta Terrestre (CT), Dinámica de la Productividad de la Tierra (DPT) y Carbono Orgánico del Suelo (COS). Además, la UNCCD proveyó de una serie de datos globales para diagnosticar los cambios en las tierras y propuso el diagnóstico de un periodo de quince años, lo que permite conocer los cambios de la tierra en el tiempo (Cowie et al., 2018; Gichenje & Godinho, 2018).

Objetivo

El objetivo del presente estudio fue determinar el estado y tendencia de la degradación de las tierras, tomando como área de investigación, el municipio de Ixtacamaxtitlán, Puebla, México, en el periodo del año 2000 al 2015, mediante de la identificación de los cambios en los indicadores propuestos en la NDT, haciendo uso del conjunto de datos globales recomendados por la UNCCD (2018) y la metodología propuesta para el seguimiento y evaluación de la DT (Sims et al., 2019).

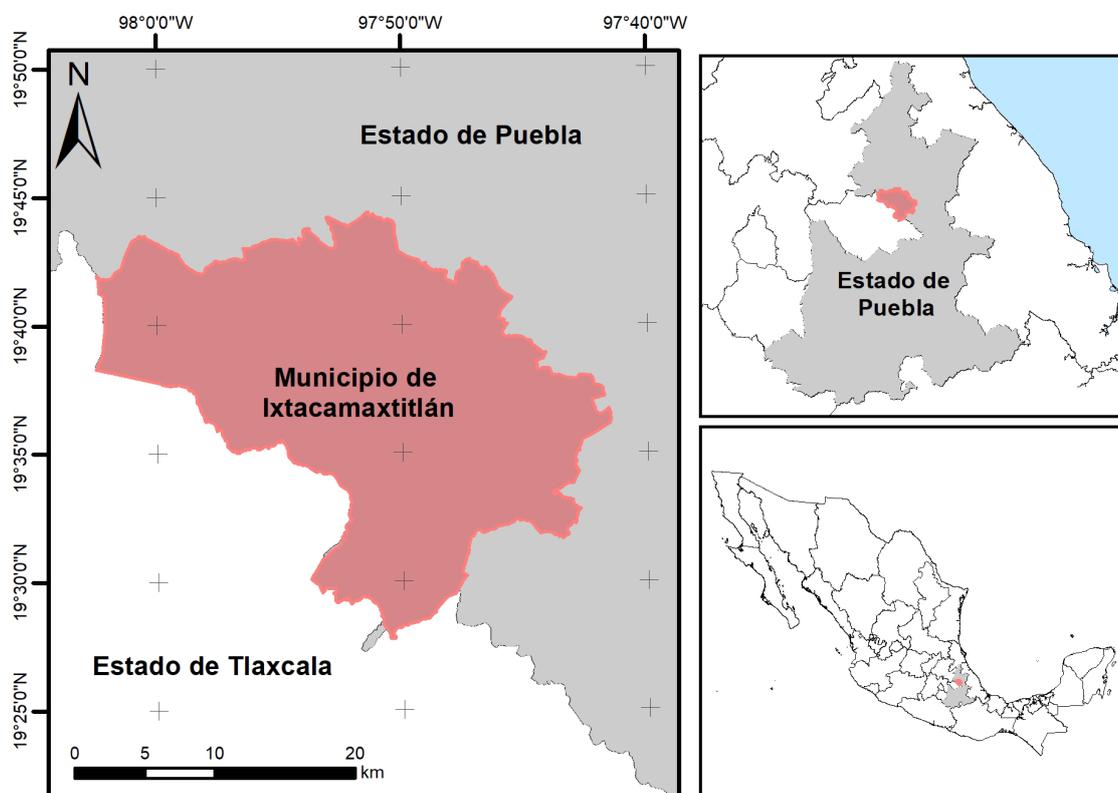
Método

Ixtacamaxtitlán está ubicado entre las latitudes 19° 27' y 19° 45'N y las longitudes 97° 41' y 98° 03'O (Figura 1). Tiene una superficie aproximada de 567.68 km² y una altitud de 2000 a 3400 m s. n. m. Presenta una precipitación media anual de 800 mm y temperaturas entre 12 y 18 °C, por lo que exhibe dos tipos de clima: templado y semifrío subhúmedo, ambos con lluvias en verano (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [Inegi], 2009).

Los leptosoles, regosoles y feozems son los suelos predominantes del municipio (Inegi, 2000). El 40% del territorio municipal se encuentra conformado por áreas forestales que incluyen tanto vegetación primaria como secundaria, abarcando bosques de pino, oyamel, táscate, pino-encino, así como zonas de matorrales desérticos rosetófilos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Comisión Nacional Forestal, 2013). Sus principales actividades económicas son del sector primario (agrícolas, pecuarias y forestales).

La CT del sitio se determinó a partir de los datos del programa de Iniciativa sobre el Cambio Climático de la Agencia Espacial Europea (ESA-CCI-LC) (UNCCD, 2018). La DPT se calculó a partir de la reclasificación de los valores del Índice Normalizado Diferencial de la Vegetación (NDVI) (Baskan et al., 2017), obtenido a partir del Espectrorradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada de Terra (MODIS, MOD13Q1) (Didan et al., 2015). La estimación de COS ($t\ ha^{-1}$), se realizó a partir de SoilGrids250 (International Soil Reference Information Center, ISRIC) (Unidad de Cambio Climático y Servicios Ambientales [UCCSA] et al., 2017).

Figura 1. Localización de área de estudio.



El análisis de los cambios de cada uno de los indicadores se llevó a cabo mediante la comparación de los mapas del comienzo y término del periodo de investigación (2000-2015), a partir de una matriz de tabulación cruzada, de acuerdo con la metodología establecida por Pontius (2004) y la UNCCD (2018). Los cambios negativos fueron considerados como áreas con degradación potencial.

Los cambios en la CT fueron clasificados como positivos o negativos según la transición de una categoría de CT a otra en el periodo de estudio (UNCCD, 2018). Las categorías de CT determinadas fueron: superficies arboladas, pastizales, tierras de cultivo y superficies artificiales.

La DPT se clasificó con base en su categoría de CT y su rango de NDVI (Baskan et al., 2017; UCCSA et al. 2017). Las clases fueron las siguientes: 1) productividad en declinación; 2) primeros signos de declinación; 3) estable pero estresada; 4) estable, no estresada; 5) productividad creciente. Se consideraron como cambios positivos las clases de DPT cuya categoría de CT presentara su máximo potencial rango de NDVI; como negativos las categorías de CT con mínimo rango de NDVI; y sin cambios, aquellas áreas con clases de DPT estables y que no hubieran presentado cambios en el periodo (Mitri et al., 2019; Sims et al., 2017, 2019).

Un cambio significativo en el COS se definió con base en las diferencias relativas de su contenido: zonas que experimentaron una disminución ($\text{COS} \geq 10\%$) se consideraron como cambios negativos, mientras que aquellas que experimentaron un aumento ($\text{COS} \geq 10\%$) se consideraron como cambios positivos (Conservation International, 2020).

El procesamiento de la cartografía y la determinación del estado y la tendencia de los indicadores se realizaron en los programas QGIS 3.12 y ArcGIS 10.4. El sistema de coordenadas utilizado en la cartografía fue WGS84 con una proyección UTM, zona 14N.

Resultados

Los cambios espaciales detectados en cada uno de los indicadores evaluados se observan en la Figura 2. La mayoría de los cambios negativos ocurrieron en la zona central del municipio, asociados a tierras de cultivo y pastizales; mientras que los cambios positivos se presentaron en zonas altas asociadas a superficies arboladas. La mayor parte del municipio no presentó cambios en el periodo analizado.

El cambio en la cubierta terrestre es crucial en cuestiones ambientales ya que se encuentra ligado a problemáticas como el cambio climático, la conversión y fragmentación de las tierras, entre otras (Orr et al., 2017). En el municipio de Ixtacamaxtitlán los cambios negativos se presentaron en 16.69 km², estuvieron dados por la pérdida de superficies arboladas debido al aumento de pastizales; la pérdida de superficies arboladas y pastizales se debieron al aumento de tierras de cultivo y la pérdida de tierras de cultivo, al aumento de superficies artificiales (Tabla 1). Por otro lado, los cambios positivos estuvieron asociados a la ganancia de superficies arboladas por la disminución de pastizales; estos cambios representaron una superficie de 2.28 km².

Tabla 1. Extensión de las categorías de Cubierta Terrestre.

Categoría de Cubierta Terrestre (CT)	Extensión 2000 (Km²)	Extensión 2015 (Km²)
Superficies Arboladas	207.61	207.35
Pastizales	153.44	139.49
Tierras de cultivo	205.26	219.41
Superficies artificiales	1.36	1.42

La mayor parte del municipio permaneció estable en cuanto a los cambios en la CT, sin embargo, las tendencias se consideran negativas debido a que los cambios negativos fueron mayores que los positivos y estuvieron dados por la transición de áreas naturales (superficies arboladas y pastizales) a áreas productivas o artificiales.

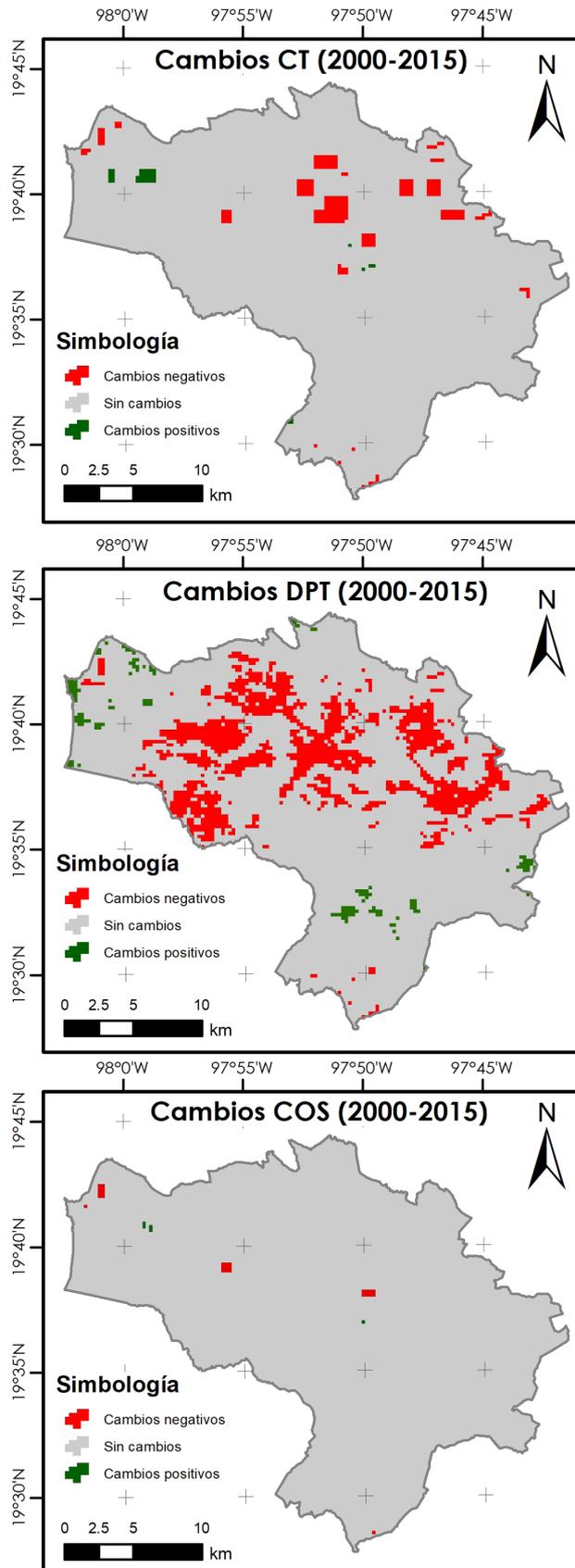


Figura 2. Cambios de los indicadores en el periodo de estudio (2000-2015).

La evaluación del estado y cambio en la cobertura vegetal se emplea para analizar las transformaciones en la superficie terrestre, vinculadas a procesos de degradación o recuperación (Orr et al., 2017). Los cambios negativos en la DPT se presentaron en 100.29 km² del municipio, asociados a clases de productividad "en declinación" en tierras de cultivo y superficies artificiales; "con primeros signos de declinación" en pastizales y, finalmente, productividad "estable pero estresada" en superficies arboladas (Tabla 2). Los cambios positivos ocuparon 9.48 km² y se presentaron en dinámicas con productividad "creciente" en la categoría de superficies arboladas. De la misma forma que, en el indicador de CT, la DPT del municipio presentó una tendencia negativa en el periodo analizado, ya que los cambios negativos superaron a los cambios positivos.

Tabla 2. Extensión de las clases de Dinámica de Productividad de la Tierra (DPT).

Categoría de CT	Clases de DPT (Km ²)				
	1	2	3	4	5
Superficies Arboladas			0.44	197.44	9.48
Pastizales		12.66	126.76	0.06	
Tierras de cultivo	85.77	133.65			
Superficies artificiales	1.43				

El COS, vinculado a la calidad del suelo, es un indicador clave para detectar cambios a largo plazo y evaluar la acumulación de carbono; su disminución refleja un efecto común de diversas formas de degradación (Lal, 2019; UNCCD, 2015). Los cambios negativos de este indicador, en Ixtacamaxtitlán, representaron únicamente 1.69 km² de la superficie del municipio y se vincularon con la pérdida de superficies arboladas. Por otro lado, los cambios positivos se relacionaron con la expansión de esta categoría y representaron solo 0.32 km² del territorio.

De acuerdo con el promedio del contenido de COS en las categorías de CT (Tabla 3) se observó una disminución de carbono en las superficies arboladas y en las tierras de cultivo, así como un aumento del contenido de COS promedio en los pastizales; sin embargo, tomando en cuenta la superficie de cada una de estas categorías y haciendo la conversión a toneladas totales de carbono por categoría, se observa una pérdida de carbono de más de siete mil toneladas. En este sentido, este indicador también presenta una tendencia negativa debido a la disminución del contenido de COS promedio y a que los cambios negativos superaron a los cambios positivos.

Categoría de (CT)	Contenido de COS 2000 t ha ⁻¹	Contenido de COS 2015 t ha ⁻¹
Superficies Arboladas	104.34	104.29
Pastizales	16.46	77.86
Tierras de cultivo	71.57	70.73
Superficies artificiales	76.45	76.35

Tabla 3. Promedio del contenido COS según la categoría de CT durante el periodo de investigación (2000-2015).

Pese a que la mayoría del municipio muestra estabilidad durante el periodo analizado, producto de la evaluación de los indicadores, se identificaron cambios negativos que indican una potencial degradación de tierras en Ixtacamaxtitlán, abarcando 107.88 km², equivalente al 19 % del territorio.

Conclusiones

Con base en los resultados obtenidos en este estudio, se evidencian tendencias desfavorables en los tres indicadores evaluados. Los cambios en la cubierta terrestre se caracterizan por la disminución de pastizales y superficies arboladas, acompañadas de incrementos en zonas de cultivo y superficies artificiales. Específicamente, las transformaciones en la superficie están mayormente vinculadas a la transición de pastizales a tierras de cultivo, siendo los primeros los más afectados con mayores pérdidas.

Las tierras de cultivo revelan categorías de DPT consideradas como "en declinación" o con "primeros dignos de declinación"; mientras que el COS no sobrepasa las 100 t ha⁻¹ en estas categorías. Contrariamente, las superficies arboladas no muestran cambios notables en la CT durante el periodo. Presentan clases de DPT "creciente" y "estable, no estresada" y contenido promedio de COS que supera las 100 t ha⁻¹, por lo que se considera que esta categoría permanece estable.

La degradación de las tierras es resultado de una combinación de múltiples factores y es un proceso de cambio complejo; sin embargo, la determinación del estado del ambiente a nivel local proporciona información preliminar valiosa como línea de base, siendo esta el primer paso para lograr la Neutralidad de la Degradación de la Tierra.

La detección de áreas degradadas es esencial para dar prioridad a las acciones de recuperación, rehabilitación y/o restauración, así como para optimizar el uso de la tierra en su respectivo contexto. Sin embargo, será necesario realizar evaluaciones sobre el terreno para definir adecuadamente la forma de planificación de estas acciones, ya que identificar los aspectos que propician la degradación de las tierras, es un requisito fundamental para establecer la NDT.

Referencias

- Al Sayah, M.J., Abdallah, C., Khouri, M., Nedjai, R., & Darwich, T. (2019). Application of the LDN concept for quantification of the impact of land use and land cover changes on Mediterranean watersheds - Al Awali basin - Lebanon as a case study. *Catena*, 176, 264–278. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.01.023>
- Baskan, O., Dengiz, O., & Demirag, İ. T. (2017). The land productivity dynamics trend as a tool for land degradation assessment in a dryland ecosystem. *Environmental Monitoring and Assessment*, 189(5). <https://doi.org/10.1007/s10661-017-5909-3>
- Conservation International. (2020). *Trends Earth Documentation. Tracking Land Change*. UNCCD.
- Cowie, A.L., Orr, B.J., Castillo, V.M., Chasek, P., Crossman, N.D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G.I., Minelli, S., Tengberg, A.E., Walter, S., & Welton, S. (2018). Land in balance: The scientific conceptual framework for Land Degradation Neutrality. *Environmental Science and Policy*, 79, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2017.10.011>
- Didan, K., Munoz, A. B., Solano, R., & Huete, A. (2015). MODIS *Vegetation Index User 's Guide (Collection 6)*. 2015(May), 31.
- Gichenje, H. & Godinho, S. (2018). Establishing a land degradation neutrality national baseline through trend analysis of GIMMS NDVI Time-series. *Land Degradation and Development*, 29(9), 2985–2997. <https://doi.org/10.1002/ldr.3067>
- Grainger, A. (2015). Is Land Degradation Neutrality feasible in dry areas? *Journal of Arid Environments*, 112(PA), 14–24. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.05.014>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2000). Síntesis Geográfica del Estado de Puebla. In *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Inegi.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Ixtacamaxtitlán, Puebla*. Inegi.
- Lal, R. (2019). Carbon Cycling in Global Drylands. *Current Climate Change Reports*, 5(3), 221–232. <https://doi.org/10.1007/s40641-019-00132-z>
- Mitri, G., Nasrallah, G., Gebrael, K., Bou, M., Abou, M., Nader, M., Masri, N., & Choueiter, D. (2019). Assessing land degradation and identifying potential sustainable land management practices at the subnational level in Lebanon. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(9). <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7739-y>
- Orr, B. J., Cowie, A. L., Castillo, V.M., Chasek, P., Crossman, N.D., Erlewein, A., Louwagie, G., Maron, M., Metternicht, G.I., & Minelli, S. (2017). *Scientific conceptual framework for land degradation neutrality. A Report of the Science-Policy Interface*. United Nations Convention to Combat Desertification.
- Overpeck, J., Garfin, G., Jardine, A. Busch, D.E., Cayan, D. Dettinger, M., Fleishman, E. Gershunov, A. MacDonald, G., Redmond, K.T., Travis, W. R., & Udall, B. (2013). Summary for Decision Makers. En G. Garfin, A. Jardine, R. Merideth, M. Black, & S. LeRoy (Eds.), *Assessment of Climate Change in the Southwest United States: A Report Prepared for the National Climate Assessment* (pp.1–20). Island Press. https://doi.org/10.5822/978-1-61091-484-0_1
- Pontius, R. G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land

changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Comisión Nacional Forestal (2013). *Inventario Estatal Forestal y de Suelos: Puebla*. Semarnat-Conafor.

Sims, N.C., England, J.R., Newnham, G.J., Alexander, S., Green, C., Minelli, S., & Held, A. (2019). Developing good practice guidance for estimating land degradation in the context of the United Nations Sustainable Development Goals. *Environmental Science and Policy*, 92, 349–355. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.014>

Sims, N.C., Green, C., Newnham, G.J., England, J.R., Held, A., Wulder, M.A., Herold, M., Cox, S.J.D., Huete, A.R., Kumar, L., Viscarra-Rossel, R.A., Roxburgh, S.H., & McKenzie, N.J. (2017). *Good Practice Guidance: SDG Indicator 15.3.1*. [https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-10/Good Practice Guidance_SDG Indicator 15.3.1_Version 1.0.pdf](https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-10/Good%20Practice%20Guidance_SDG%20Indicator%2015.3.1_Version%201.0.pdf)

Unidad de Cambio Climático y Servicios Ambientales, Gerencia de Desarrollo y Fomento Forestal & Corporación Nacional Forestal. (2017). *Reporte de Neutralidad en la Degradación de las Tierras (NDT) ante la Convención de las Naciones Unidas de Lucha Contra la Desertificación (CNULD)*. UCCSA, Gedeff, Conaf.

United Nations Convention to Combat Desertification. (2015). *Land Degradation Neutrality Resilience At Local, National and Regional Levels*. 24. UNCCD.

United Nations Convention to Combat Desertification (2016). *Framework and Guiding Principles for a Land Degradation Indicator*. UNCCD.

United Nations Convention to Combat Desertification. (2018). *Default data: methods and interpretation A guidance document for 2018 UNCCD reporting*. UNCCD.

Una propuesta Geo Big Data para cartografiar arrozales. El caso de la cuenca de la laguna Merín en territorio Uruguayo

Giancarlo Alciaturi ^a

María del Pilar García - Rodríguez ^a

Virginia Fernández ^b

Universidad Complutense de Madrid ^a

Universidad de La República ^b

El Big Data es un novedoso enfoque informático centrado en la adquisición y tratamiento de volúmenes ingentes de datos, que surgió en entornos empresariales (Hurwitz et al., 2013), pero su aplicabilidad ha sido extendida a contextos científicos y de la cotidianidad. A partir del Big Data Goffi et al. (2020) derivan el término Geo Big Data (GeoBD), para referirse al Big Data geolocalizado con una alta resolución espacio-temporal, que es conveniente para el seguimiento de fenómenos (Gutiérrez-Puebla et al., 2016) con un elevado grado de complejidad.

En cuanto a la teledetección, Zhu (2019) constata que las tecnologías GeoBD favorecen la distribución y procesamiento de datos masivos, multitemporales, y multiescalares que provienen de las misiones para la observación de la tierra. El autor subraya las oportunidades sin precedentes y de libre acceso que, en cuanto a resolución espacial y temporal, brindan Sentinel-1 y Sentinel-2. Entre los elementos que sustentan la vertiente de GeoBD para la teledetección, destacan los datos listos para el análisis (ARD, por sus siglas en inglés), los clasificadores de última generación y la computación de alto rendimiento.

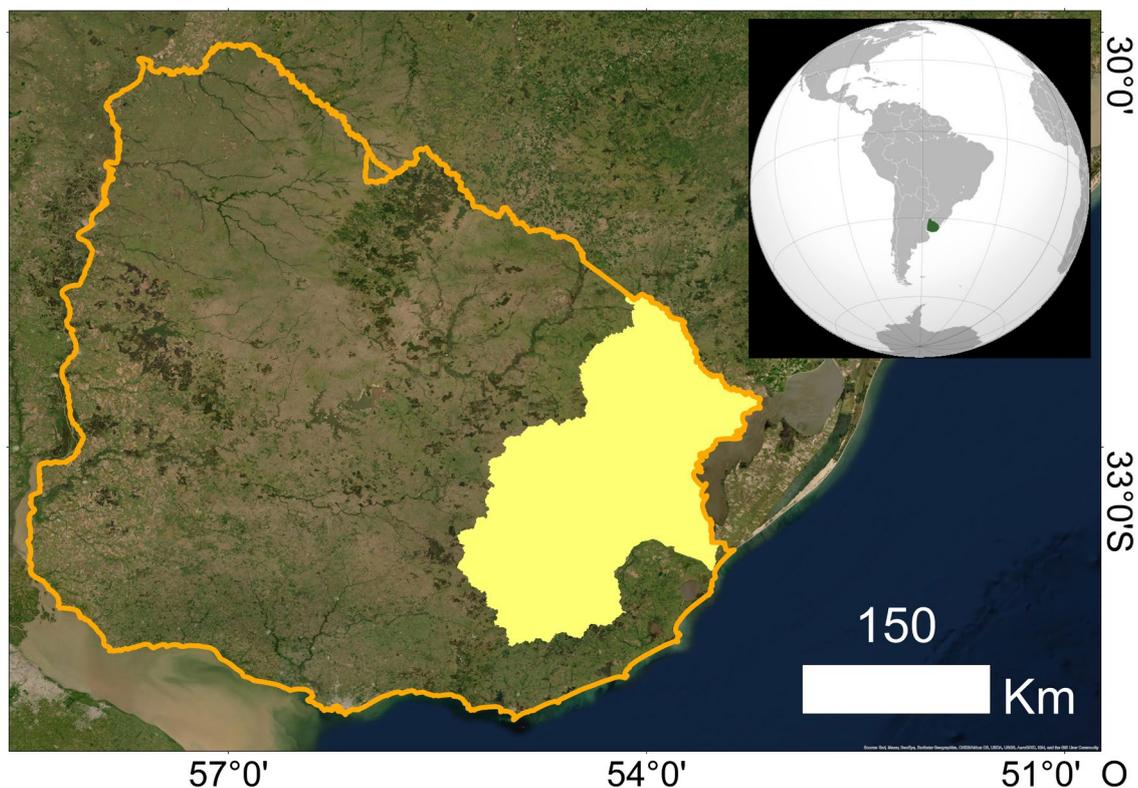
Los ARD disponen de consistencia geométrica y radiométrica (Frantz, 2019), que aportan garantías para una adecuada exactitud posicional entre datos multitemporales que pueden ser directamente utilizados en faenas de clasificación supervisada. Los clasificadores de última generación como el Random Forest y el Support Vector Machine resaltan por su capacidad para operar con grandes volúmenes de datos (Zagajewski et al., 2021). El manejo de estos medios demanda elevados requerimientos informáticos (Gomes et al., 2020) que se satisfacen con la computación de alto rendimiento. La comunidad científica puede acceder a estas oportunidades a través de plataformas web, entre las cuales sobresalen Google Earth Engine y Microsoft Planetary Computer.

Objetivo

Mediante tecnologías GeoBD, como el clasificador Random Forest y los ARD Sentinel-1 y Sentinel-2, esta investigación tiene por objetivo, desarrollar un método para cartografiar los arrozales de la cuenca de la laguna Merín en territorio uruguayo (Figura 1) para la zafra 2019-2020.

El área de estudio posee 27 892 km² y a nivel de cuencas hidrográficas arroceras es la más representativa del país en términos de superficie cultivada, número de trabajadores y tradición histórica (Cánepa, 2020). El citado objetivo se articula con la clasificación de dos categorías de Uso y Cobertura del Suelo (UCS): arrozales y no arrozales. La última abarca cuerpos de agua, monte nativo, forestaciones, áreas inundables, pastizales, campos pos cosecha, otros cultivos de verano, zonas inundables y áreas urbanas.

Figura 1. La cuenca de la laguna Merín en territorio uruguayo.



Metodología

La metodología comprende fases como la revisión de la literatura, la consulta a expertos, la búsqueda de los ARD Sentinel-1 (S1GRD) y Sentinel-2 (S2A), el desarrollo de un juego multitemporal, la creación de los campos de entrenamiento, la clasificación supervisada, la ejecución de una campaña en el terreno y la validación de la cartografía. El tratamiento informático es ejecutado en Google Earth Engine.

La primera fase consistió en la identificación de fuentes documentales en repositorios como Google Scholar, Scopus y Web of Science. Los esfuerzos se destinaron a identificar prácticas para cartografiar los arrozales mediante la percepción remota y el GeoBD. Un hallazgo clave revela que, para la clasificación supervisada, se debe disponer de series temporales que modelen las etapas del sustrato del arrozal (Zhao & Ma, 2021).

Para ahondar en la dinámica evolutiva del cultivo en el área de estudio (cuenca de la laguna Merín), con miras en la identificación de los ARD para formar las series temporales, en una segunda fase, se consultó a expertos de la Asociación de Cultivadores de Arroz y del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Se encontró que la zafra dura entre mediados de octubre de 2019 y finales de marzo de 2020.

A partir de las dos primeras fases metodológicas, se propuso que la búsqueda de S1GRD y S2A se canalizara para identificar conjuntos de imágenes según su captura

mes a mes (grupo mensual) desde noviembre de 2019 hasta mayo de 2020. Aunque se superó la duración de la zafra, la persistencia de rastros después de marzo podría resaltar las diferencias de los arrozales.

S1GRD y S2A cuentan con una cadena de procesamiento propuesta por la Agencia Espacial Europea (Google for Developers, 2021). Para la cuenca de la laguna Merín (CLM), S1GRD se adquirió en *Interferometric Wide Swath* (Franja Ancha Interferométrica) nodo descendente, son productos ortocorregidos del tipo *Ground Range Detected* o GRD (Rango de Terreno Detectado), con remoción de ruido térmico y calibración radiométrica. El coeficiente de retrodispersión (dB) expresa el valor de sus píxeles. Los S2A son ortorectificados con corrección atmosférica a nivel de superficie según el modelo de transferencia radiativa *LIBRADTRAN* (Mayer & Kylling, 2015).

Espectralmente, la búsqueda de S1GRD se limitó a la polarización Vertical-Horizontal (VH); mientras que, para S2A, se hizo lo propio con B4, B8, B11, y una cobertura nubosa menor a 10%. Se obtuvo un conjunto que consta de 87 productos de radar (Tabla 1); y otro de 51 ópticos (Tabla 2). El primero se designa como S1GRD_VH, mientras que S2_B4B8B11 alude al segundo. Dadas las restricciones impuestas por la cobertura nubosa, no hay S2A adecuados para el mes de abril.

Conjunto	Grupo mensual	Cantidad de productos
S1GRD VH	Nov 2019	12
	Dic 2019	13
	Ene 2020	12
	Feb 2020	13
	Mar 2020	12
	Abril 2020	13
	May 2020	12

Tabla 1. Conjunto S1GRD_VH según grupo mensual y cantidad de imágenes.

Tabla 2. Conjunto S2_B4B8B11 según grupo mensual y cantidad de imágenes.

Conjunto	Grupo mensual	Cantidad de productos
S2A B4B8B11	Nov 2019	10
	Dic 2019	5
	Ene 2020	10
	Feb 2020	10
	Mar 2020	7
	May 2020	9

A partir de los productos contenidos en cada grupo mensual, se generaron los compuestos mensuales de mediana (CMM) que se detallan en la Tabla 3. Los derivados de S1GRD_VH revelan el valor mediano mensual de la banda VH, mientras que aquellos computados a partir de S2_B4B8B11 contienen la métrica relativa a las bandas ópticas.

Tabla 3. Compuestos mensuales de mediana según origen.

	Origen	
	S1GRDVH	S2AB4B8B11
Compuestos mensuales de mediana (CMM)	VH_Nov2019	OPT_Nov2019
	VH_Dic2019	OPT_Dic2019
	VH_Ene2020	OPT_Ene2020
	VH_Feb2020	OPT_Feb2020
	VH_Mar2020	OPT_Mar2020
	VH_Abr2020	OPT_May2020
	VH_May2020	

Con los CMM se produjeron dos mosaicos: uno que integra datos de radar (S1_CLM) y otro compuesto por datos ópticos (S2_CLM). Una primera aproximación para diferenciar visualmente los arrozales se hace con el insumo multitemporal S1_CLM VH_Nov2019/

VH_Ene2020/ VH_Feb2020 (Figura 2). Se distinguen sustratos con bajo o alto dinamismo fenológico. Los primeros se aprecian en tonos de blanco, gris y negro, mientras que los segundos se identifican con colores. Como ejemplos, sobresalen el tono blanco que exhibe el monte nativo; y los cian que dan cuenta de los arrozales como una cobertura fenológicamente dinámica.

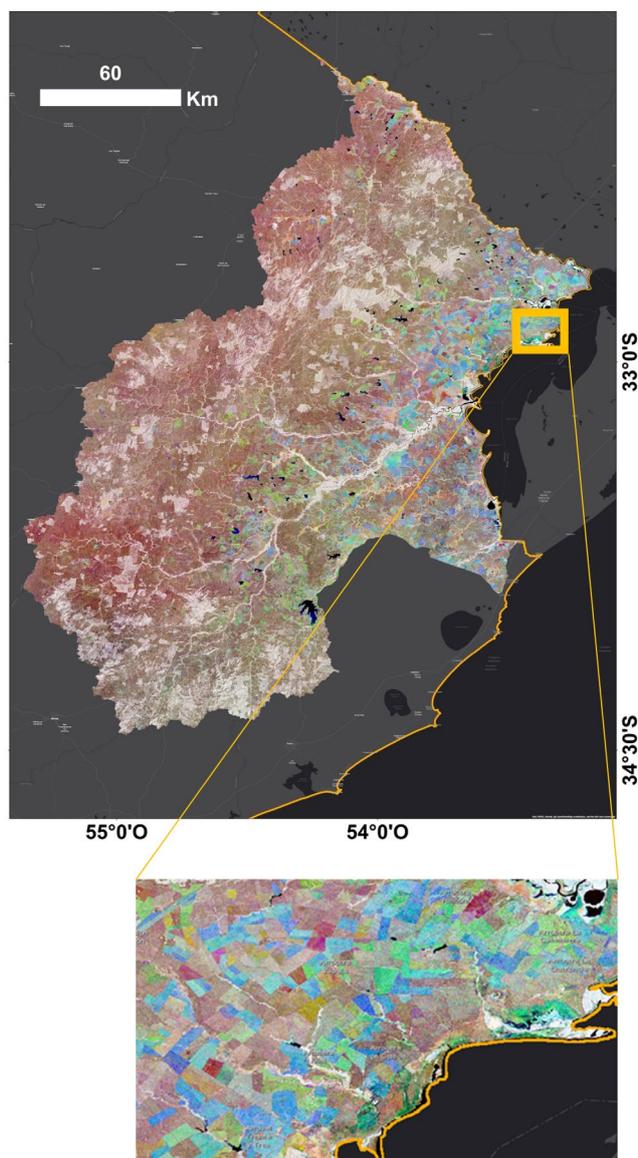
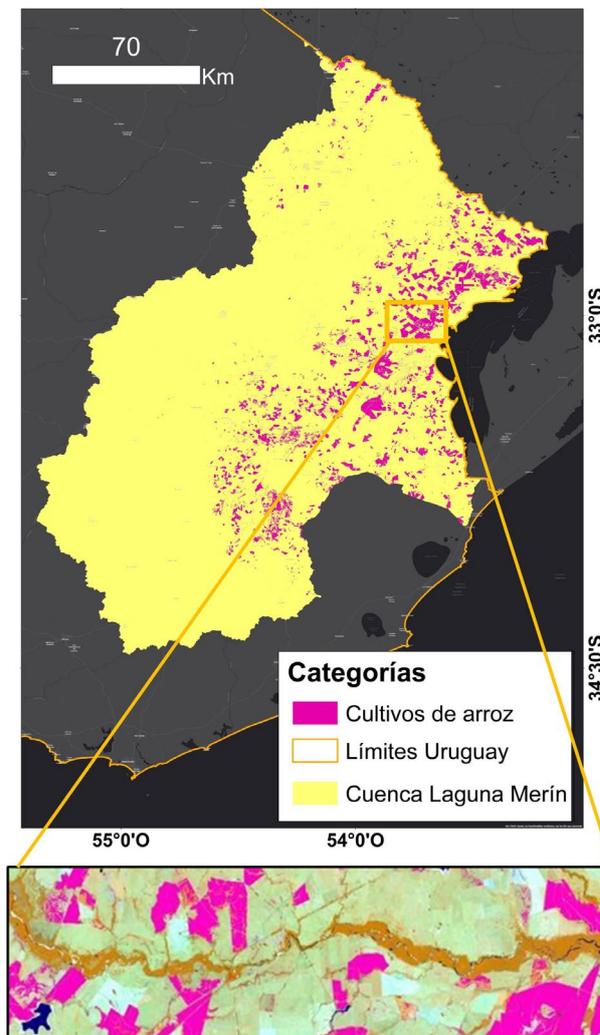


Figura 2.
Composición
multitemporal del
mosaico S1_CLM.

Como una vía para visualizar el mosaico óptico, se tomó el CMM OPT_Feb2020 con RGB B8/B11/B4 (Figura 3). Bajo este esquema, los arrozales se identifican con contornos geométricos regulares y fuertes tonos de color anaranjado. Lo último da cuenta del cultivo durante una de sus etapas de alto vigor vegetal. Una explicación más concisa sobre las relaciones entre el estado evolutivo del cultivo y su representación en los CMM ópticos, se ofrece en párrafos posteriores.

Figura 3. Compuesto temporal S2 RGB B8/B11/B4, Feb 2020.



La integración de S1_CLM y S2_CLM en un archivo de bandas intercaladas resulta en el juego multitemporal (JMT), que sirve como punto de partida para la clasificación supervisada. Al incluir series temporales que aportan datos espectrales relacionados con diversas etapas de desarrollo de los arrozales, se proyecta que el JMT permita la discriminación efectiva entre estas áreas y la clase de "no arrozales".

Los campos de entrenamiento se hacen para formar algunas muestras representativas de los valores espectrales de las clases objeto de mapeo. En cuanto a los arrozales, se digitalizaron polígonos en varias áreas donde se nota la evolución particular del sustrato. La tarea se apoyó en la interpretación visual de los respectivos CMM bajo RGB B8/B11/B4.

De acuerdo con el ejemplo presentado en la Figura 4, se inicia con suelo desnudo (OPT_Nov2019) que, para el momento, sugiere una siembra reciente. En OPT_Dic2019 se identifican tonos oscuros que corresponden a áreas anegadas con vegetación de desarrollo incipiente. En los tres periodos sucesivos, se destacan diversos estados de vegetación que alcanzan su madurez máxima en marzo. Posteriormente, se reconoce el rastrojo (OPT_May2020).

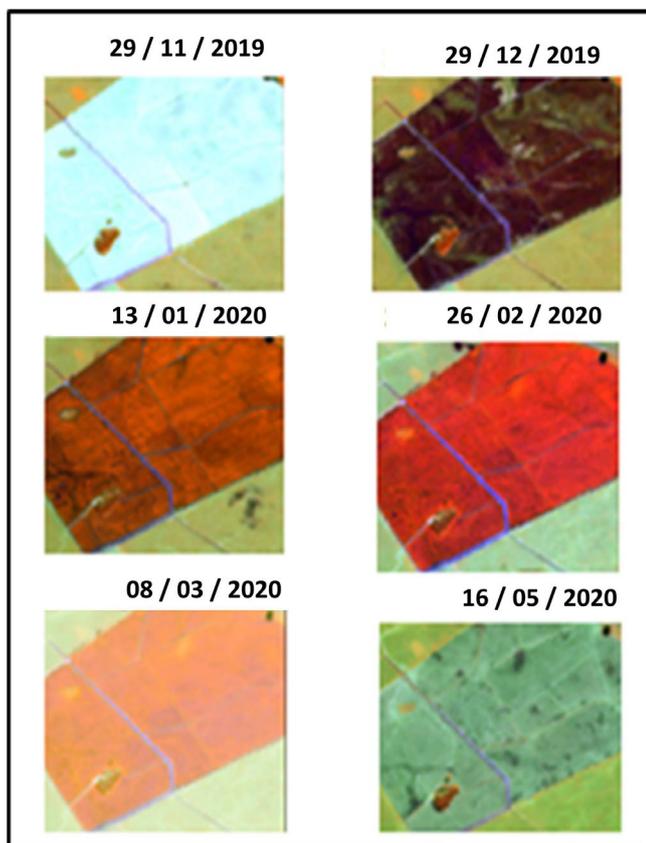


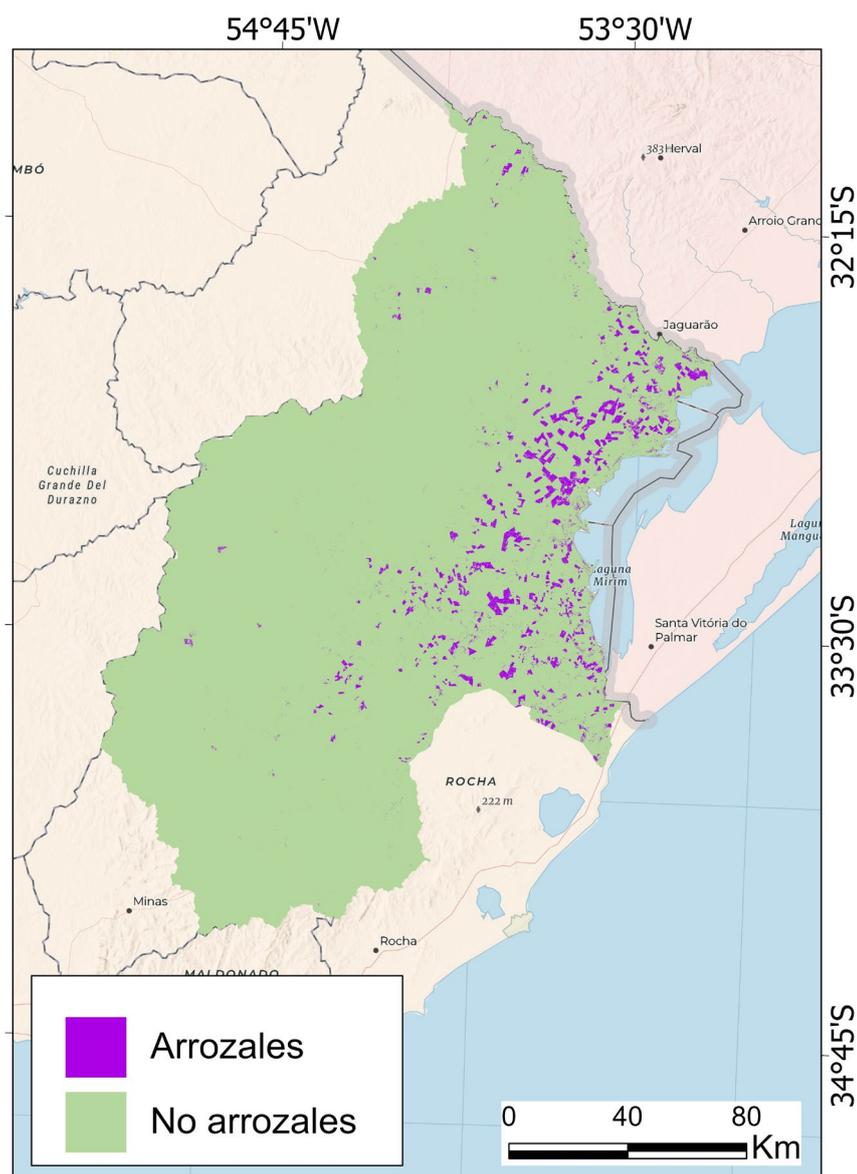
Figura 4. Ejemplo de un polígono de entrenamiento de arrozal.

Random Forest es usado por su capacidad para generar clasificaciones precisas (Belgiu & Drăguț, 2016). Se asignaron los valores de 150, 4 y 2, para los hiperparámetros número de árboles, variables por división y número mínimo de hojas, respectivamente. Los datos para validar se recolectaron *in situ* durante una campaña de la Dirección Nacional de Calidad y Evaluación Ambiental. Se hizo una matriz de confusión para tener las estadísticas de fiabilidad de la cartografía resultante.

Resultados

La cartografía resultante muestra las clases "arrozales" y "no arrozales" (Figura 5). En la primera se alcanzó una precisión del productor del 85% y una precisión del usuario del 86%. Para la segunda, estas estadísticas fueron del 85% y 83%, respectivamente. La fiabilidad global es de 85% y el Índice Kappa de 0.70. Se calculó una superficie de 1 221 km² para la clase de arrozales, lo que sugiere una sobreestimación si se coteja con los 1 007 km² registrados en la encuesta de arroz para la zafra 2019-2020 del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (2020) de la Región Este del Uruguay. La comparación se admite en la medida de que dicha región circunscribe la parte mayoritaria de su espacio en la cuenca de la laguna Merín.

Figura 5. Cartografía de los arrozales y no arrozales, zafra 2019-2020.



Discusión y conclusión

Con estadísticas de fiabilidad aceptables, se válida la cartografía que cumple con el objetivo de la investigación. No obstante, es crucial que, en futuras oportunidades, se optimicen estas métricas y se minimicen las sobreestimaciones del área de los arrozales. Este perfeccionamiento puede lograrse mediante la elaboración de una cartografía más completa que incluya las categorías generales de Uso y Cobertura de Suelo del área de estudio, lo que comprende cuerpos de agua, monte nativo, forestaciones, áreas inundables, pastizales, otros cultivos de verano, y zonas urbanas.

Para alcanzar la mejora, es viable implementar un plan de trabajo que podría incluir, pero no limitarse a: crear Juegos Multitemporales con diferentes patrones, implementar distintos clasificadores y densificar la base de datos de validación. Para lo primero y mediante Sentinel-1 y Sentinel-2, se propone crear Juegos Multitemporales formados por conjuntos temporales agregados en intervalos de tiempo más acotados en comparación a los grupos mensuales que se modelaron en este trabajo.

Para implementar clasificadores como Random Forest y Support Vector Machine es oportuno ajustar sus hiperparámetros y comparar su rendimiento mediante una validación de la cartografía. Esta validación debe respaldarse en una base de datos contentiva de muestras que incluyan consistentemente todas las categorías de Uso y Cobertura de Suelo propuestas. En conclusión, se demuestra la eficacia de herramientas de GeoBD como Google Earth Engine y los ARD Sentinel-1 y Sentinel-2 para abordar cuestiones espaciales complejas.

Referencias

- Belgiu, M., & Drăguț, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing*, *114*, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Cánepa, G. (2020). Caracterización de dos pueblos de trabajadores arroceros en el Uruguay. *PEGADA - A Revista da Geografia do Trabalho*, *21*(2), 18–44. <https://doi.org/10.33026/peg.v21i2.7067>
- Frantz, D. (2019). FORCE–Landsat + Sentinel-2 analysis ready data and beyond. *Remote Sensing*, *11*(9), 1124. <https://doi.org/10.3390/rs11091124>
- Goffi, A., Bordogna, G., Stroppiana, D., Boschetti, M., & Brivio, P. (2020). A Scalable Synthesis of Multiple Models of Geo Big Data Interpretation. *Journal of Software Engineering and Applications*, *13*(06), 104. <https://doi.org/10.4236/jsea.2020.136008>
- Gomes, V., Queiroz, G., & Ferreira, K. (2020). An overview of platforms for big earth observation data management and analysis. *Remote Sensing*, *12*(8), 1253. <https://doi.org/10.3390/rs12081253>
- Google for Developers. (2021). *Sentinel Collections*. <https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/sentinel>.
- Gutiérrez-Puebla, J., García-Palomares, J., & Salas-Olmedo, M. (2016). Big (geo) data en ciencias sociales: retos y oportunidades. *Revista de estudios andaluces*, *33*(1), 1–23. <https://dx.doi.org/10.12795/rea.2016.i33.01>
- Hurwitz, J., Nugent, A., Halper, F., & Kaufman, M. (2015). *Big Data for Dummies*. For Dummies.
- Mayer, B., & Kylling, A. (2005). The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmospheric Chemistry and Physics*, *5*(7), 1855–1877. <https://doi.org/10.5194/acp-5-1855-2005>
- Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca. (2020). *Encuesta de arroz 2019/20*. https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/sites/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/files/2020-08/Pub_Arroz%202019-20final_0.pdf
- Zagajewski, B., Kluczek, M., Raczko, E., Njegovec, A., Dabija, A., & Kycko, M. (2021). Comparison of random forest, support vector machines, and neural networks for post-disaster forest species mapping of the Krkonoše/Karkonosze Transboundary Biosphere Reserve. *Remote Sensing*, *13*(13), 2581. <https://doi.org/10.3390/rs13132581>
- Zhao, L. & Ma, M. (2021). Mapping paddy rice with satellite remote sensing: a review. *Sustainability*, *13*(2), 503. <https://doi.org/10.3390/su13020503>
- Zhu, Z. (2019). Science of Landsat analysis ready data. *Remote Sensing*, *11*(18), 2166. <https://doi.org/10.3390/rs11182166>

II. **SECCIÓN**

Estudios urbanos

Una aproximación a la calidad de vida intraurbana

Judith Ley García

Fabiola Maribel Denegri de Dios

Instituto de Investigaciones Sociales,
Universidad Autónoma de Baja California

El desarrollo sostenible ha sido concebido como un modelo centrado en las personas que busca mejorar la calidad de vida actual sin comprometer las oportunidades de las generaciones futuras. El modelo postula que existen vínculos entre las dimensiones económica, social y ambiental que, desde una perspectiva social, significa comprender que el bienestar humano no puede sostenerse sin que exista un medio ambiente saludable o en ausencia de una economía vibrante (Torjman, 2000).

Desde la primera conferencia Hábitat de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), se registró la preocupación internacional por la rápida urbanización de los países en desarrollo y sus efectos negativos en el hábitat; pues “la condición de los asentamientos humanos determina en gran medida la calidad de vida” de quienes los habitan (ONU, 1976, p.2). De ahí que, para Myers (1987), la noción de calidad de vida ha llegado a significar “habitabilidad”, y se construye a partir de las características del hábitat que los residentes experimentan cotidianamente, así como de las evaluaciones subjetivas que sobre él realizan.

En este mismo orden de ideas, en la definición de la agenda mundial de desarrollo, Naciones Unidas incluyó el logro de Ciudades y comunidades sostenibles (Objetivo 11) en los diecisiete Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS), considerando que no se puede lograr el desarrollo sostenible sin un cambio profundo en la forma en que se construye y gestiona el espacio urbano (Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo [PNUD], 2021). Para tal fin, se propuso la Nueva Agenda Urbana (ONU, 2017, p.5) como un instrumento para lograr un vínculo entre la urbanización y el desarrollo, con la finalidad de crear ciudades y asentamientos humanos “justos, seguros, sanos, accesibles, asequibles, resilientes y sostenibles” de tal forma que se promueva “la prosperidad y la calidad de vida para todos”, mediante la urbanización inclusiva.

No obstante, la construcción de ciudades inclusivas representa un gran desafío, especialmente en países como México, donde se requiere atender múltiples aspectos de las dimensiones espacial, social y económica de la urbanización que, históricamente han representado un cúmulo de rezagos y carencias para una parte importante de la población. Entre las metas definidas para alcanzar el ODS 11 en el 2030 se encuentran: asegurar el acceso generalizado de las personas a viviendas, servicios básicos, seguridad, transporte público, zonas verdes y espacios públicos adecuados; así como la reducción del impacto ambiental negativo y de pérdidas por desastres (ONU, 2017; PNUD, 2021).

Un punto de partida en este camino es conocer el estado en que se encuentran actualmente las ciudades. Para ello existen diversas propuestas de indicadores que permiten evaluar y comparar las ciudades del mundo, o bien, generar conocimiento a nivel nacional y estatal. Sin embargo, aún son escasas las propuestas que permiten indagar acerca de las condiciones que prevalecen al interior del espacio urbano, como insumo básico para los gobiernos locales, quienes son los encargados directos de la gestión urbana.

Objetivo

En este sentido, el objetivo de este trabajo es analizar la calidad de vida en la ciudad de Mexicali. Esto mediante el cálculo del índice de Calidad de Vida Intraurbana (ICVI) que incorpora una serie de indicadores ambientales y socioeconómicos, tomando como unidad espacial de análisis la manzana.

Método

La calidad de vida urbana, entendida como el grado en que se posibilita la satisfacción de las necesidades de los habitantes, involucra un componente objetivo y otro subjetivo. El primero se refiere a las condiciones de vida de los habitantes, mientras que el segundo da cuenta de la percepción que estos tienen o la valoración que hacen de tales condiciones y de la vida en general en la ciudad (Urzúa & Caqueo-Urizar, 2012).

Para el cálculo del ICVI se tomó como base la propuesta de Valdivia-Cisneros et al. (2020), quienes evalúan las dimensiones ambiental, social y económica de la calidad de vida en barrios marginales, incorporando los componentes objetivo y subjetivo.

El presente ejercicio se centró exclusivamente en los indicadores objetivos. Además, para su aplicación a nivel intraurbano fue necesario modificar o sustituir algunos indicadores. Así, se obtuvieron dieciséis indicadores (Tabla 1) que corresponden a las dimensiones ambiental (DA) y socioeconómica (DS) de la calidad de vida, obteniéndose el ICVI mediante el promedio de los indicadores.

$$ICVI = \frac{(\sum DA + \sum DS)}{(N_A + N_S)}$$

Las fuentes de información fueron las siguientes: El censo poblacional del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2020) y el directorio de empresas y establecimientos de Inegi (2021); el inventario de parques y jardines del Ayuntamiento de Mexicali (AM, 2020a) y las rutas de transporte (AM, 2020b); el atlas de riesgos de la Universidad Autónoma de Baja California (UABC et al., 2011); los datos de incidencia delictiva de la Guardia Estatal de Seguridad e Investigación (GESI, 2019); los polígonos de atención prioritaria del Sistema Educativo Estatal (SEE, 2015) y de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Sedatu, 2019); y los valores catastrales de Periódico Oficial del Estado (POE, 2019). Para los indicadores de cobertura se obtuvieron las distancias del sistema normativo de la Secretaría de Desarrollo Social (Sedesol, 1999) y de los indicadores de la Dirección de Extensión y Servicios Externos (DESE, 2017).

Clave	Indicador	Fuente
DA01	Porcentaje de viviendas que poseen servicios básicos	Inegi (2020)
DA02	Cobertura del equipamiento básico colectivo (salud, educación y recreación)	Inegi (2021) y AM (2020a)
DA03	Cobertura del transporte público	AM (2020b)
DA04	Porcentaje de viviendas que poseen tecnologías de información y comunicación (TIC)	Inegi (2020)
DA05	Nivel de calidad ambiental (contaminación del suelo y del aire)	Inegi (2020)
DA06	Porcentaje de viviendas con piso de tierra	Inegi (2020)
DA07	Nivel de exposición a peligros (geológicos, hidrometeorológicos y químicos)	UABC et al. (2011)
DA08	Nivel de calidad ambiental (contaminación del suelo y del aire)	UABC et al. (2011)
DA01	Nivel de incidencia delictiva básica	GESI (2019)
DA02	Presencia del gobierno (programas) (salud, educación y recreación)	Sedatu (2019) y SEE (2015)
DA03	Nivel educativo de población (>14 años)	Inegi (2020)
DA04	Porcentaje de población derechohabiente de servicios de salud de información y comunicación (TIC)	Inegi (2020)
DA05	Porcentaje de población con discapacidad	Inegi (2020)
DA06	Porcentaje de población ocupada	Inegi (2020)
DA07	Nivel de valor del suelo hidrometeorológicos y químicos)	POE (2019)
DA08	Porcentaje de población de 6 a 17 años que asiste a la escuela	Inegi (2020)

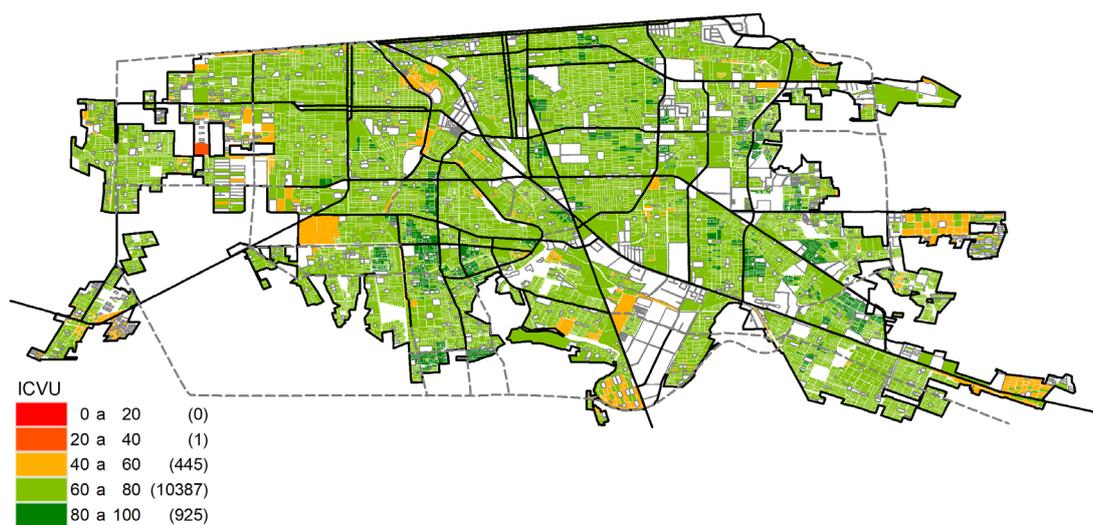
Tabla 1. Indicadores de calidad de vida intraurbana.

Resultados

Para la ciudad de Mexicali, el Inegi (2020) reporta un total de 13,600 manzanas, de las cuales 11,758 están habitadas, el resto corresponde a equipamiento, instalaciones industriales y otros usos de suelo. De las manzanas con viviendas particulares habitadas, 96% presentó un ICVI alto o muy alto y, como se observa en la Figura 1, estas se distribuyen en toda la ciudad, mientras que las manzanas con niveles medio y bajo (4%) se encuentran en la periferia y en la porción central de la mancha urbana.

Este resultado concuerda con lo reportado en el Índice de Marginación del Consejo Nacional de Población (Conapo, 2020) y el Índice de Desarrollo Humano del PNUD (2019) que identifican a Mexicali como uno de los municipios mexicanos con menor nivel de marginación y mayor grado de desarrollo humano, respectivamente.

Figura 1. Índice de Calidad de Vida Urbana por manzana.



No obstante, no todos los componentes de la calidad de vida son plenamente cubiertos en el espacio urbano de Mexicali. Al contrario, mientras que 98% de las manzanas presentó niveles alto y muy alto en la dimensión ambiental (Tabla 2), solo 60% de ellas obtuvo tales niveles en la dimensión socioeconómica (Tabla 3).

En la dimensión ambiental, los indicadores presentaron un comportamiento heterogéneo. Por un lado, se encuentran aquellos con altos niveles de desempeño como son: la cobertura de los servicios básicos (DA01), la disponibilidad de TIC (DA04), el no presentar hacinamiento (DA05) o piso de tierra (DA06); así como la ubicación segura con respecto a los peligros naturales y químicos (DA07). Aunque, este último indicador debe interpretarse con cuidado, pues expresa el nivel de exposición, es decir, 85% de las manzanas están expuestas a uno o menos de los tipos de peligro analizados (geológicos, hidrometeorológicos y químicos), mientras que el 15% restante, corresponde a las manzanas que están expuestas a los tres tipos.

Por otro lado, están las coberturas parciales, como sucede con el equipamiento urbano (DA02), donde sólo 58% de las manzanas cuenta con los tres tipos analizados (salud, educación y recreación), 22% cuenta con dos de ellos y 18% con ninguno; con la cobertura del transporte público (DA03), con 23% de las manzanas lejos de alguna ruta; y con la calidad ambiental (DA08) donde 51% de las manzanas se localiza en zonas con menores niveles de contaminación del aire y del suelo.

Niveles	1 y 2	3	4 y 5
DA01	1%	0%	99%
DA02	18%	26%	56%
DA03	23%	0%	77%
DA04	3%	13%	84%
DA05	0%	0%	100%
DA06	0%	0%	100%
DA07	15%	0%	85%
DA08	11%	37%	51%
DA	0%	2%	98%
ICVI	0%	4%	96%

Tabla 2. Indicadores de la dimensión ambiental.

Con respecto a los indicadores de la dimensión socioeconómica (Tabla 3), los que obtuvieron mejor puntaje fueron las personas con derechohabencia a servicios de salud (DS04), las personas sin discapacidad (DS05), así como las personas menores de edad que asisten a la escuela (DS08). Mientras que, en el resto de los indicadores, menos de la mitad de las manzanas presentó niveles alto y muy alto.

Tabla 3. Indicadores de dimensión socioeconómica.

Niveles	1 y 2	3	4 y 5
DA01	34%	17%	49%
DA02	85%	0%	15%
DA03	19%	52%	29%
DA04	1%	4%	94%
DA05	0%	0%	100%
DA06	7%	73%	19%
DA07	34%	29%	37%
DA08	1%	2%	97%
DA	0%	40%	60%
ICVI	0%	4%	96%

Además, es notorio que una tercera parte de las manzanas se ubica en zonas con alta o muy alta incidencia delictiva (DS01), 34% tiene un valor del suelo bajo o muy bajo (DS06), la escolaridad máxima promedio es la secundaria en 71% de ellas (DS08) y niveles favorables de independencia económica se presenta sólo en 19% de las manzanas.

Reflexiones finales

A partir del Índice de Calidad de Vida Intraurbana se pudo identificar, como reportan algunas fuentes oficiales de información, que en la ciudad de Mexicali predominan los niveles de calidad de vida alto y muy alto, ya que la mayoría de las viviendas cuentan con servicios básicos, TIC, espacios suficientes y materiales adecuados. Además, una parte importante de los habitantes es derechohabiente de servicios de salud, carece de alguna discapacidad que le impida trabajar o estudiar; y la mayoría de los menores de edad asisten a la escuela.

No obstante, un número importante de viviendas se encuentran localizadas en una zona insegura (por amenazas naturales, químicas o delincuencia) o de mala calidad ambiental, sin acceso al transporte público o a todos los tipos de equipamiento urbano que se requieren para llevar una buena vida en la ciudad. Esta situación refleja un déficit de inversión pública en materia de desarrollo urbano que, además de deteriorar el valor del suelo en algunas zonas, promueve y exagera las desigualdades al interior del espacio urbano.

Por su parte, algunos indicadores muestran puntos de conflicto. Por ejemplo, aunque se tiene un alto desempeño en afiliación a servicios de salud y en personas en edad escolar asistiendo a la escuela, se presentan deficiencias en las coberturas de los equipamientos que permiten atender tales derechos. Estas incongruencias ocurren principalmente en la periferia urbana, marcando un desfase entre el ritmo de crecimiento de la ciudad y la capacidad de atención de las necesidades de los habitantes por parte de las autoridades; pero, también, muestran la dificultad que tienen los habitantes de tales zonas para acceder a una buena calidad de vida por sus propios medios.

En este sentido, el modelo de urbanización presente en Mexicali deposita en los ciudadanos la responsabilidad de atender sus propias necesidades, aun cuando, en una parte importante de la ciudad, las condiciones de dependencia económica, nivel de escolaridad y carencia de apoyo gubernamental no permitan hacerlo. Por tanto, se trata de un modelo excluyente que no permite avanzar en el logro de ciudades y asentamientos humanos “justos, seguros, sanos, accesibles, asequibles, resilientes y sostenibles”, como un paso trascendental en el camino hacia el desarrollo sostenible.

Referencias

- Ayuntamiento de Mexicali. (2020a). *Distribución de parques y jardines en la ciudad de Mexicali* [Conjunto de datos]. AM.
- Ayuntamiento de Mexicali. (2020b). *Rutas de transporte público en Mexicali*. Sistema Municipal del Transporte.
- Consejo Nacional de Población. (2020). *Índice de marginación por entidad federativa y municipio*. Conapo. <https://www.gob.mx/conapo/documentos/indice-de-marginacion-por-entidad-federativa-y-municipio-2020>
- Dirección de Extensión y Servicios Externos. (2017). *Construcción de Sistema de indicadores y estándares de calidad de vida y desarrollo urbano en Chile. Informe final*. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Guardia Estatal de Seguridad e Investigación. (2019). *Base de datos de incidencia delictiva* [Conjunto de datos]. GESI. <https://www.seguridadbc.gob.mx/contenidos/estadisticas5.php>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de Población y Vivienda 2020*. Aguascalientes: Inegi.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2021). Directorio de empresas y establecimientos. Periodo 2021/05. Aguascalientes: Inegi.
- Myers, D. (1987). Community-relevant measurement of quality of life. A focus on local trend. *Urban Affairs Quarterly*, 23(1), 108-124. <https://doi.org/10.1177/004208168702300107>
- Organización de las Naciones Unidas. (1976). Informe de Hábitat. Conferencia de las Naciones Unidas sobre los Asentamientos Humanos. Naciones Unidas. <https://undocs.org/es/A/CONF.70/15>
- Organización de las Naciones Unidas. (2017). *Nueva Agenda Urbana*. Naciones Unidas.
- Periódico Oficial del Estado de Baja California*. (2019). Decreto No. 35 mediante el cual se aprueba tabal de valores catastrales unitarios, base del impuesto predial del municipio de Mexicali, Baja California, para el ejercicio fiscal 2020, 67.
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. (2019). *Informe de Desarrollo Humano Municipal 2010-2015. Transformando México desde lo local*. PNUD.
- Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo. (2021). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. PNUD. <https://www.mx.undp.org/content/mexico/es/home/sustainable-development-goals.html>
- Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano. (2019). *Polígonos de Atención Prioritaria (PAP) en Mexicali, Baja California*. Sedatu.
- Secretaría de Desarrollo Social. (1999). *Sistema normativo de equipamiento urbano*. Sedesol.
- Sistema Educativo Estatal. (2015). *Polígonos conflictivos y de extrema pobreza en Baja California*. SEE.
- Torjman, S. (2000). *The social dimension of sustainable development*. Caledon Institute of Social Policy.

Universidad Autónoma de Baja California, Ayuntamiento de Mexicali & Secretaría de Desarrollo Social. (2011). *Atlas de riesgos del municipio de Mexicali*. Actualización 2011. Informe. Mexicali, México.

Urzúa, A. & Caqueo-Urizar, A. (2012). Calidad de vida: una revisión teórica del concepto. *Terapia Psicológica*, 30(1), 61-71.

Valdivia-Cisneros, A., Peña-Villafuerte, L., & Huaco-Zúñiga, M. (2020). Instrumento de medición del Índice de Calidad de Vida Urbana: Barrios Urbano Marginales, Perú. *Revista de Ciencias Sociales*, 26, 355-375.

Análisis geomorfológico-estructural de Chilpancingo Guerrero: marco de acciones resilientes ante riesgos geológicos

Jesús Alfonso Carreto Gutiérrez ^a

Alma Villaseñor Franco ^a

Oscar Frausto Martínez ^b

Universidad Autónoma de Guerrero ^a

Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo ^b

En el mundo, los desastres dejan un impacto socioeconómico considerable, afectando principalmente a los países que se encuentran en desarrollo. A nivel global, durante 2022 se registraron 387 situaciones de desastre, las cuales generaron pérdidas económicas de 224 mil millones de dólares y 185 mil millones de personas afectadas (Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, 2023). La década de la acción 20-30 se destaca por la generación de marcos de implementación para el cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030.

En la actualidad, se hace evidente que el desarrollo de las geotecnologías y su implementación han facilitado un profundo análisis de la información espacial y esto se debe a las fuentes principales de datos tales como: los sensores remotos, los sistemas satelitales de navegación global y, el que más se destaca, los Sistemas de Información Geográfica, herramienta que posibilita el tratamiento y análisis de información en formato de tipo vectorial y ráster, permitiendo atender problemas complejos asociados con el espacio geográfico (Olaya, 2014). En ese sentido, implementar herramientas geomáticas mejora la precisión y eficacia en estudios de geomorfología aplicada, lo que, en términos de desarrollo territorial sustentable, facilita la toma de decisiones informadas en la gestión del territorio, la planificación urbana y la reducción de riesgo de desastres.

Este trabajo de investigación tiene por objetivo contribuir en el desarrollo sostenible para la reducción de riesgo de desastres en un contexto local, implementando técnicas de innovación y la aplicación de herramientas tecnológicas. El estudio se fundamenta en el análisis de la estructura geomorfológica, como rama de la geomorfología que estudia los elementos del relieve topográfico asociados a procesos endógenos y a las formas que reflejan la dinámica de la estructura geológica, así como a la determinación de movimientos neotectónicos a partir de las propiedades cualitativas y cuantitativas del relieve (Lugo, 1988).

Así, se estudian los mecanismos geodinámicos que inciden sobre el contexto de la ciudad de Chilpancingo, Guerrero, y que influyen en el riesgo geológico para su población, por lo que el estudio de estas morfologías, así como de sus relaciones espaciales respecto a otros componentes del relieve posibilitan una mejor comprensión asociada al riesgo de origen geológico-geomorfológico. Finalmente, se parte de que la definición del riesgo geomorfológico destaca la probabilidad de que cierto fenómeno, producto de una inestabilidad morfológica, tenga lugar en un territorio y en un periodo de tiempo (Panizza, 1987).

Por la posición geográfica en la que se encuentra la ciudad de Chilpancingo, de acuerdo con la regionalización sísmica de México (Comisión Federal de Electricidad, 1993), es susceptible a amenazas naturales de origen geológico, ya que se sitúa en la región sísmica de alto riesgo, producto de la subducción entre la placa de Cocos y la placa norteamericana. Ante ese escenario, es necesario desarrollar estudios de riesgos naturales en contextos geodinámicos complejos a nivel local, con el fin de comprender el riesgo de desastre en su dimensión espacial, el grado de exposición de las personas y la caracterización de las amenazas como lo dicta la prioridad número uno del Marco de Sendai de la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015), convirtiéndose en un instrumento para la planificación territorial, destinadas

mitigar del riesgo de desastre y promover la construcción de ciudades seguras y resilientes ante riesgos geológicos.

Esta prioridad es apremiante debido a que la población mundial alcanzó los 8 000 millones de personas en noviembre de 2022, de las cuales más de la mitad (55 %) viven en zonas urbanas, cifra que se prevé aumente al 70 % para el año 2050 (Organización de las Naciones Unidas, 2023). Así, esta dinámica de crecimiento es continua en la mayoría de las ciudades y, en la ciudad de Chilpancingo, existe un contexto que se caracteriza por presentar un patron expansivo de urbanización al registrar una tasa de crecimiento anual de vivienda en 5.4%, superior a la de la población (2.3%) (H. Ayuntamiento constitucional Chilpancingo, 2018). Dada esta situación, la creación de marcos de acciones resilientes ante riesgos geológicos resulta sustancial para el crecimiento sostenible de ciudades, que además de buscar la protección de las personas, pretende prepararlas para responder a las emergencias y minimizar riesgos futuros, y que pueda servir como instrumento de planificación y orden territorial.

Objetivo

Se propone integrar el análisis geomorfológico estructural y técnicas geodésicas para la gestión de riesgos de origen geológico en el contexto urbano de la ciudad de Chilpancingo, centrándose en comprender la actividad morfotectónica mediante la identificación y el estudio de la dinámica de los elementos morfoestructurales presentes en el relieve, a partir del cálculo de las velocidades de desplazamiento obtenidas del monitoreo de redes geodésicas de alta precisión distribuidas en el área de estudio.

Zona de estudio

La ciudad de Chilpancingo se encuentra localizada a una latitud 17° 33' 30" norte y longitud 99° 30' 33" oeste. Se ubica en la región centro del estado de Guerrero, y pertenece a la unidad fisiográfica de México "Sierra Madre del Sur". Desde el punto de vista geográfico, su posición se encuentra en un subcomplejo morfoestructural, por un lado, se sitúa sobre la zona de transición entre dos regiones hidrográficas, la cuenca hidrográfica del Río Balsas-Mezcala y la Cuenca del Río Papagayo, ambos sistemas hidrológicos importantes para el país (Carreto, 2022, p. 105) y, de acuerdo con la clasificación morfoestructural, corresponde con el macrobloque de Guerrero Occidental (Hernández et al., 1995, p.48). Asimismo, se sitúa sobre un complejo estructural regional, donde los mecanismos geodinámicos de actividad convergente marcan un proceso subductivo que da forma a la Sierra Madre del Sur (Ramírez-Herrera et al., 2021).

La ciudad de Chilpancingo es de tamaño medio, ya que registra una población de 225 728 habitantes (Instituto Nacional de Estadística, y Geografía [Inegi], 2020). En comparación con 2010, su población creció un 20.58%. Finalmente, la cobertura del área de estudio comprende la carta topográfica E14C28e, escala 1:20,000 del Inegi (2017) (Figura 1); la dimensión espacial se basa en el análisis del contexto urbano.

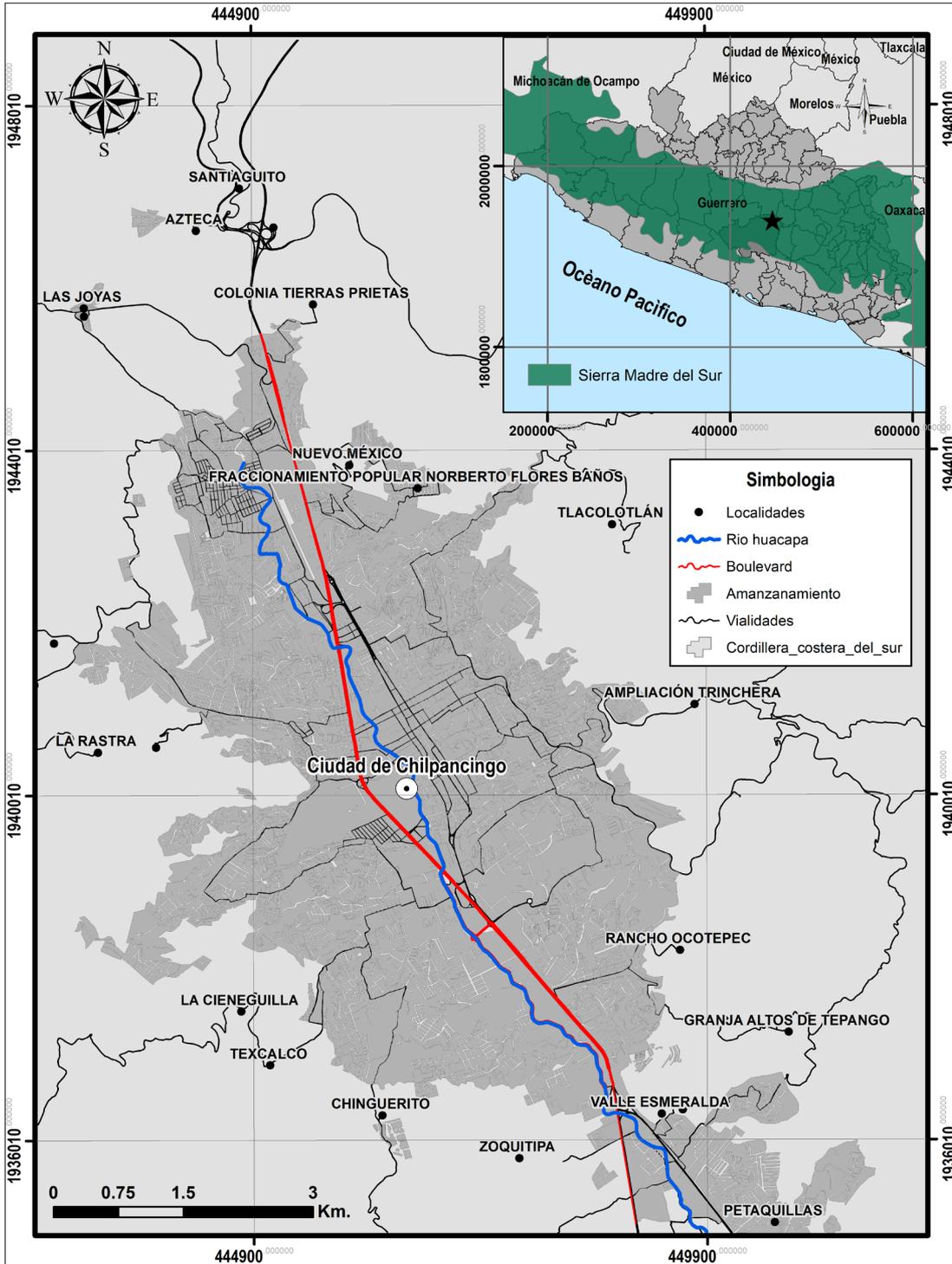


Figura 1. Ubicación geográfica de la ciudad de Chilpancingo, Guerrero.

Materiales y métodos

Para el logro de los objetivos de esta investigación se desarrolló una secuencia metodológica basada en las siguientes etapas: a) Análisis morfométrico del relieve, b) Análisis de la sismicidad, c) Caracterización de elementos estructurogeomorfológicos, y d) Cálculo de la actividad morfotectónica.

a) Análisis morfométrico del relieve

De acuerdo con Panek (2004), la configuración geométrica es prioritaria en el análisis del estudio geomorfológico. Por tal motivo, se definieron cuatro análisis básicos de reconocimiento morfoestructural: hipsometría, inclinación o pendiente del terreno y la configuración de la red hidrográfica superficial, para ello se siguieron las recomendaciones de Lugo (1988), quien señala que la morfometría es la cuantificación de los elementos del relieve.

b) Análisis de la sismicidad

Caracterizar la actividad sísmica resulta importante para definir los sectores de alto riesgo sismotectónico en la región, además de establecer las relaciones geodinámicas con otros elementos morfológicos, se convierte en un componente para la gestión efectiva del riesgo y la seguridad de la población (Gupta & Biswas, 2023). Para ello, se realizó una compilación de los epicentros, su intensidad y profundidad de los sismos.

c) Caracterización geomorfológica estructural

Durante esta etapa, se considera la interpretación de los elementos o rasgos morfoestructurales en el relieve y que están asociados a procesos tectónicos, lo anterior se fundamenta en los principios de Ramírez-Herrera et al. (2021) y de Arnouset al. (2023). Esta fase, se basa en el análisis morfométrico de indicadores morfológicos obtenidos de la carta geológica del Servicio Geológico Mexicano (2006), imágenes satelitales (Lansat 8) y el modelo digital de elevaciones (Inegi, 2013). Estos insumos cartográficos permiten realizar una zonificación geomorfológica de ambiente morfoestructural y determinar las formas disyuntivas en el sitio de estudio. Así, se confeccionó un modelo sombreado del relieve como componente primordial en el estudio geomorfológico estructural con un ángulo de altitud solar de 45°, lo que permitió resaltar las variaciones en la elevación del terreno y reconocer patrones morfológicos dispuestos en una dirección dominante condicionados por la actividad endógena.

d) Identificación de la actividad morfotectónica

A través de un análisis geodésico y con los sistemas GNSS de posicionamiento geoespacial de cobertura global, se determinaron los movimientos geodinámicos de la Tierra, considerando para ello los principios de Berné (2014) y Barba et al. (2023). Así, por medio de un monitoreo de redes geodésicas con la tecnología GNSS Leica GS15 sobre los vértices pertenecientes a la Red Geodésica Nacional Pasiva (RGNP) del Inegi fue posible reconocer las deformaciones menores y determinar la actividad morfotectónica en la ciudad de Chilpancingo. La observación en el monitoreo geodésico se realizó por el método estático, siguiendo los lineamientos técnicos y normativos que establece el marco geodésico de referencia para México regidos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2010, 2015).

Resultados

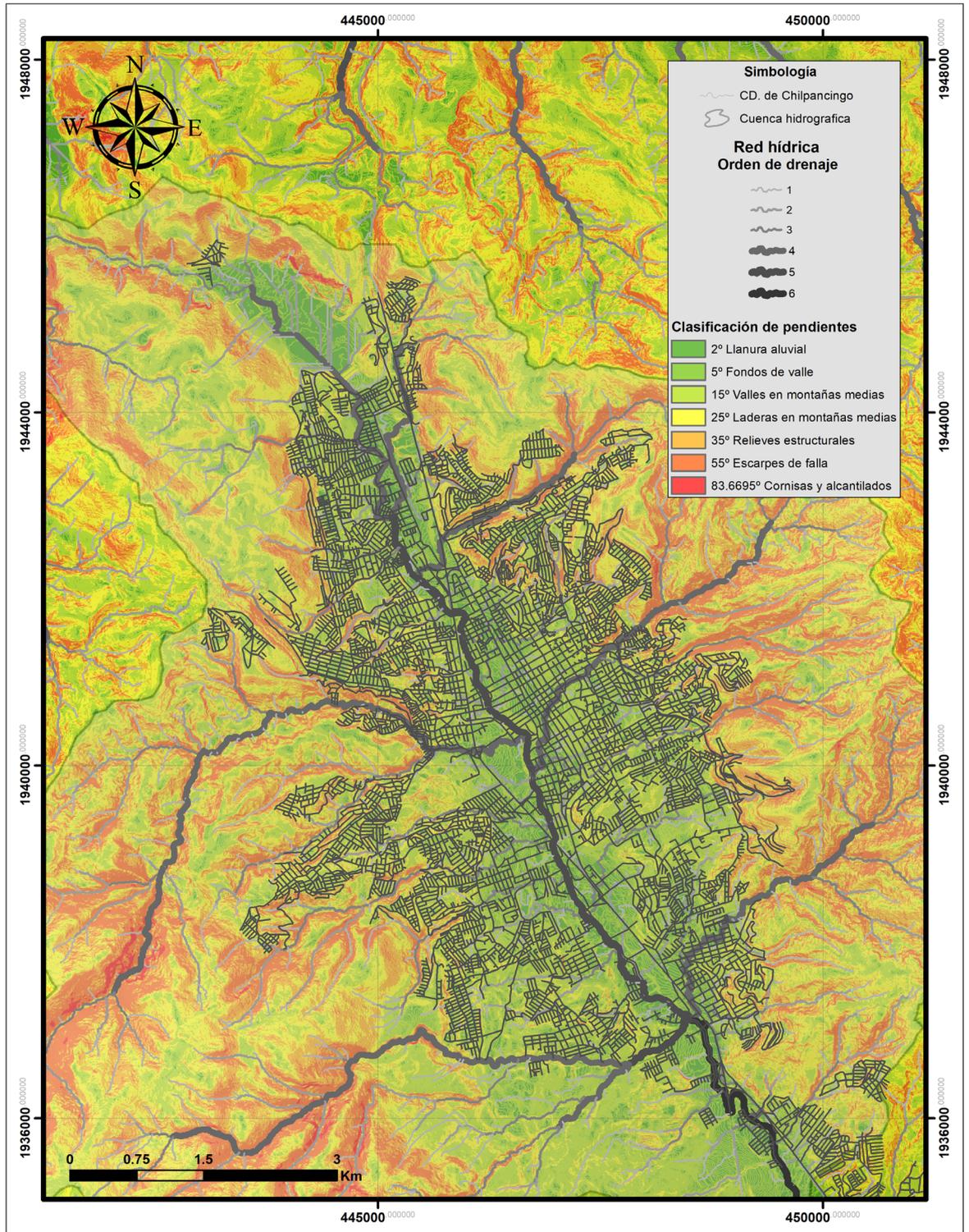
Los resultados se presentan en tres apartados: caracterización morfométrica, sismicidad, geomorfología estructural y geodinámica.

Caracterización morfométrica

La configuración geográfica en la que se encuentra la ciudad de Chilpancingo presenta valores de altitud máxima de hasta 2 500 m y mínimas de hasta 1 100 m. Resalta una energía del relieve de 1 400 m en su contexto territorial. Esta propiedad morfométrica pone en manifiesto una gran dinámica de procesos, siendo una evidencia clara aquellos de actividad endógena relacionados con la exógena (principalmente gravitacional y fluvial) que ocurren en el área de estudio, donde la inclinación del terreno alcanza pendientes escarpadas superiores a 25° de inclinación y la densificación del sistema fluvial, controlado por la dinámica estructural con ríos de cuarto, quinto y sexto orden que representan límites de bloques estructurales que parten la ciudad en una red ortogonal con dirección NW - SE (Figura 2).

El mapeo hidrológico superficial muestra como la ciudad de Chilpancingo se encuentra asentada sobre depósitos aluviales del Cuaternario (Qoal), constituidos por el sistema de abanicos aluviales paralelos al Río Huacapa, cuyos depósitos están formados de conglomerado débilmente cementado. En el análisis de la inclinación del terreno se logró reconocer como el crecimiento urbano continua hacia las zonas montañosas y las laderas moderadas. Este hecho incluye zonas puntuales clasificadas como relieves estructurales cuya susceptibilidad del suelo a los procesos de erosión y de derrumbes son imperantes.

Figura 2.
Morfometría del relieve en el contexto local de la ciudad de Chilpancingo, Guerrero.



Sismicidad

De acuerdo con los registros del Servicio Sismológico Nacional (SSN) del Instituto de Geofísica (2012) de la UNAM, en el estado de Guerrero se presenta un 25% del total de los movimientos telúricos a nivel nacional. Entre los eventos sísmicos más importantes se destacan: el terremoto de 1985, ocurrido en las costas de Michoacán con magnitud de 8.1; en 2017, el Golfo de Tehuantepec fue azotado por un terremoto de magnitud 8.2 y, recientemente, en septiembre de 2021 se registró en la ciudad de Acapulco un terremoto de magnitud de 7.1 (SSN, 2021).

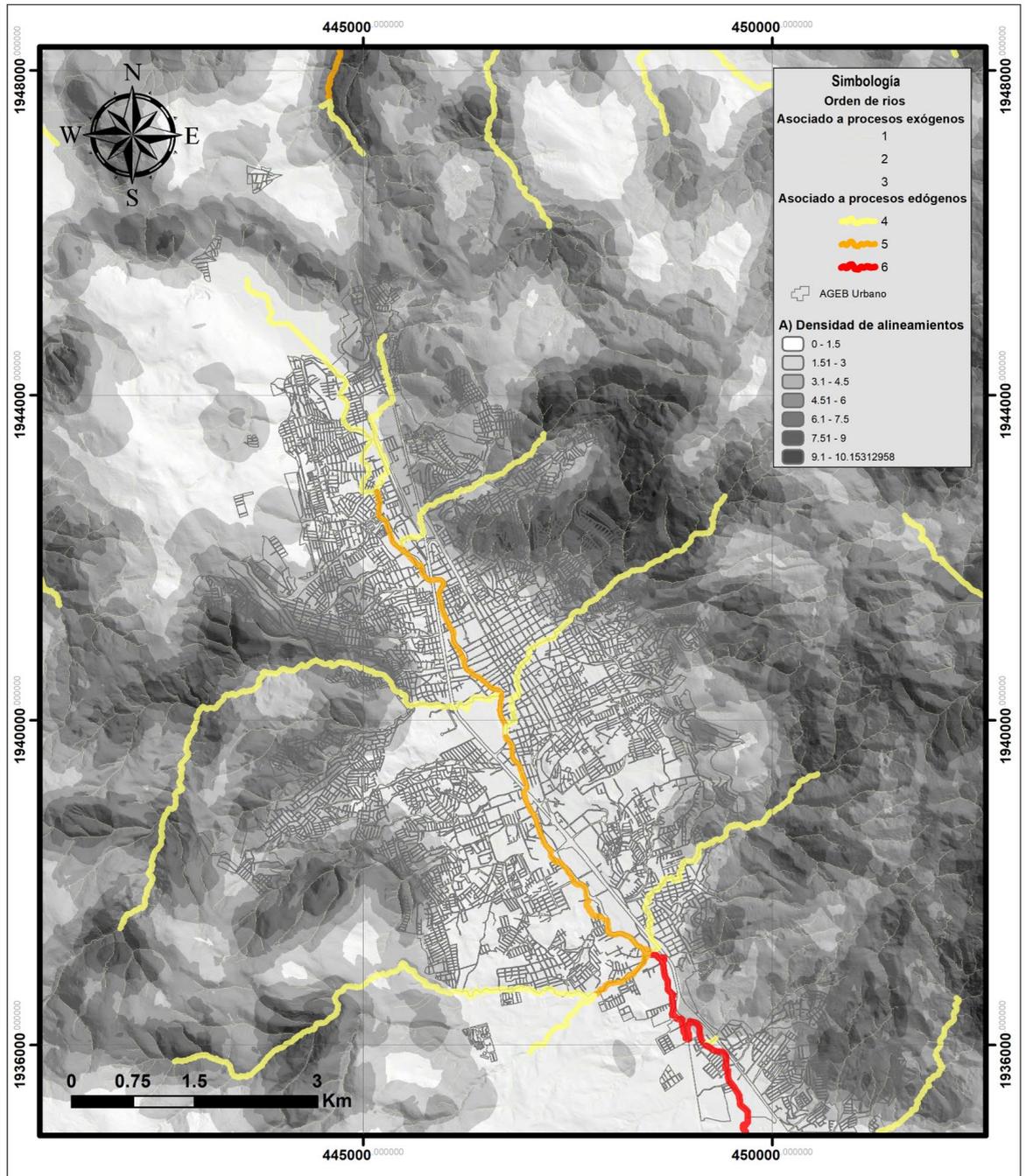
En la zona de estudio, hasta el año 2021, se registraron 16 eventos sísmicos (todos de tipo somero), cuyo foco sísmico se encuentra entre 5 y 15 km de profundidad (Figura 3). La distribución sísmica sobre el territorio muestra una evidente correlación espacial con discontinuidades geológicas como fallas, contactos litológicos y fracturas, en otros casos el epicentro se concentra sobre rasgos geomorfológicos de valles fluviales de cuarto orden y, para la región centro-meridional de la ciudad, se identifica un sistema focal de sismos. Estos eventos son evidencia de principales procesos geodinámicos activos que, además de ser modeladores del relieve topográfico, tienen incidencia en el desarrollo de formas disyuntivas locales. Esto se manifiesta en las diversas estructuras plegadas y disyuntivas de mecanismo normal, inversas y transcurrentes que se localizan en el contexto territorial en el que se posiciona la ciudad de Chilpancingo.

Germología estructural

La caracterización de morfologías asociadas a procesos endógenos se obtuvo por la interpretación de los parámetros de las propiedades del relieve topográfico y la tectónica del sector de estudio. Así, las principales evidencias de estos procesos se representan por cambios abruptos en la dirección de los valles, valles disecados de gran profundidad (de hasta 200 metros), escarpas de falla de más de 300 metros de altura), fallas y fracturas que han facilitado la determinación del sistema de lineamientos en sus distintas orientaciones.

Bajo tal enfoque, el sistema de características geomorfológicas asociadas a la tectónica constituyó la base fundamental para la diferenciación geomorfológica de la ciudad de Chilpancingo. Al analizar el sistema de densificación de lineamientos, se identificaron dos extensiones territoriales con máxima concentración de rasgos estructurales: La primera se localiza en el sector nororiental del sector urbanizado, donde se cuenta con la presencia de valles modernamente disecados de orden 4 que cortan ortogonalmente al valle central de la ciudad, denominado como Río Huacapa (Figura 3). La segunda se ubica en el sector norponiente de la ciudad, destacada por la presencia de relieves escarpados, evidencia sísmica y la presencia de los mecanismos geodinámicos de tipo normal "falla el fresno" y dextral "falla Ixtamalco", además del anticlinal "Amojileca", desarrollados sobre un relieve kárstico.

Figura 3. Elementos estructurales en el relieve topográfico asociados a procesos endógenos en la ciudad de Chilpancingo.



Geodinámica

Bajo la condición del proceso de validación física de las marcas geodésicas se evaluaron 48 vértices pertenecientes a la Red Geodésica Nacional Activa establecidos por el Inegi. De acuerdo con el criterio geomorfológico, se realizó la selección para la medición de 18 vértices para el año 2021. La mayoría de los vértices se establecieron en 2014, uno en 2005 y otro en 2018, por lo que, en términos estadísticos, se observa que el predominio en 90% del marco espaciotemporal monitorizado es de siete años (Tabla 1). El análisis de los resultados de las mediciones geodésicas en distintas épocas, resultó de la comparación de los valores altitudinales tanto para el eje vertical (Z) como para el horizontal (X, Y), en magnitud y orientación, respecto a la medición inicial para la ciudad. Los hallazgos indican desplazamientos horizontales que varían entre 0.047 cm y 0.40 cm en el vértice V121698, ubicado en la colonia Dr. Catalán, al poniente de la ciudad.

Este sector se distingue por su proximidad a la barranca Tonalapa, clasificada como de alto riesgo, según la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil del Estado de Guerrero (Gobierno del Estado de Guerrero, 2009, p. 55). Los desplazamientos en la componente vertical revelan movimientos negativos (hundimientos) que oscilan entre -0.009 y movimientos positivos (levantamientos) de hasta 0.764 cm en el vértice V121751 (Figura 4). Este hito geodésico se localiza en el sector suroccidental de la ciudad, caracterizada por una región geomorfológica de montañas de mediana altura, la presencia cauces fluviales con control estructural de orden 4, así como por el mecanismo geodinámico de tipo normal conocido como "la falla San Antonio".

Tabla 1. Velocidades de desplazamiento de la red geodésica horizontal distribuido por el territorio de la ciudad de Chilpancingo Guerrero (2014-2021).

Estaciones Geodésicas Horizontales (EGH)	Velocidad de desplazamiento (X)	Velocidad de desplazamiento (Y)	Velocidad de desplazamiento horizontal	Velocidad de desplazamiento vertical
V121787	-0.057	-0.018	0.602	-0.104
V121707	-0.061	0.009	0.062	-0.096
V121785	-0.096	0.043	0.105	-0.074
V121795	-0.044	0.0434	0.062	-0.159
V120282A	-0.005	0.039	0.04	-0.098
V121701	-0.092	-0.0437	0.103	0.305
V121743	-0.083	0.011	0.084	-0.017
V121751	-0.075	-0.005	0.075	0.764
V121757	-0.075	0.004	0.075	-0.057
V121758	-0.055	0.023	0.06	-0.116
V121784	-0.086	0.001	0.086	-0.065
V121699	0	0.021	0.021	-0.01
V120081	-0.0456	0.012	0.047	-0.328
V121698	0.4	0.043	0.402	-0.083
V121761	0.149	0.011	0.15	0.035
V121709	0.018	0.018	0.16	-0.106
V121744	0.036	0.47	0.059	-0.009

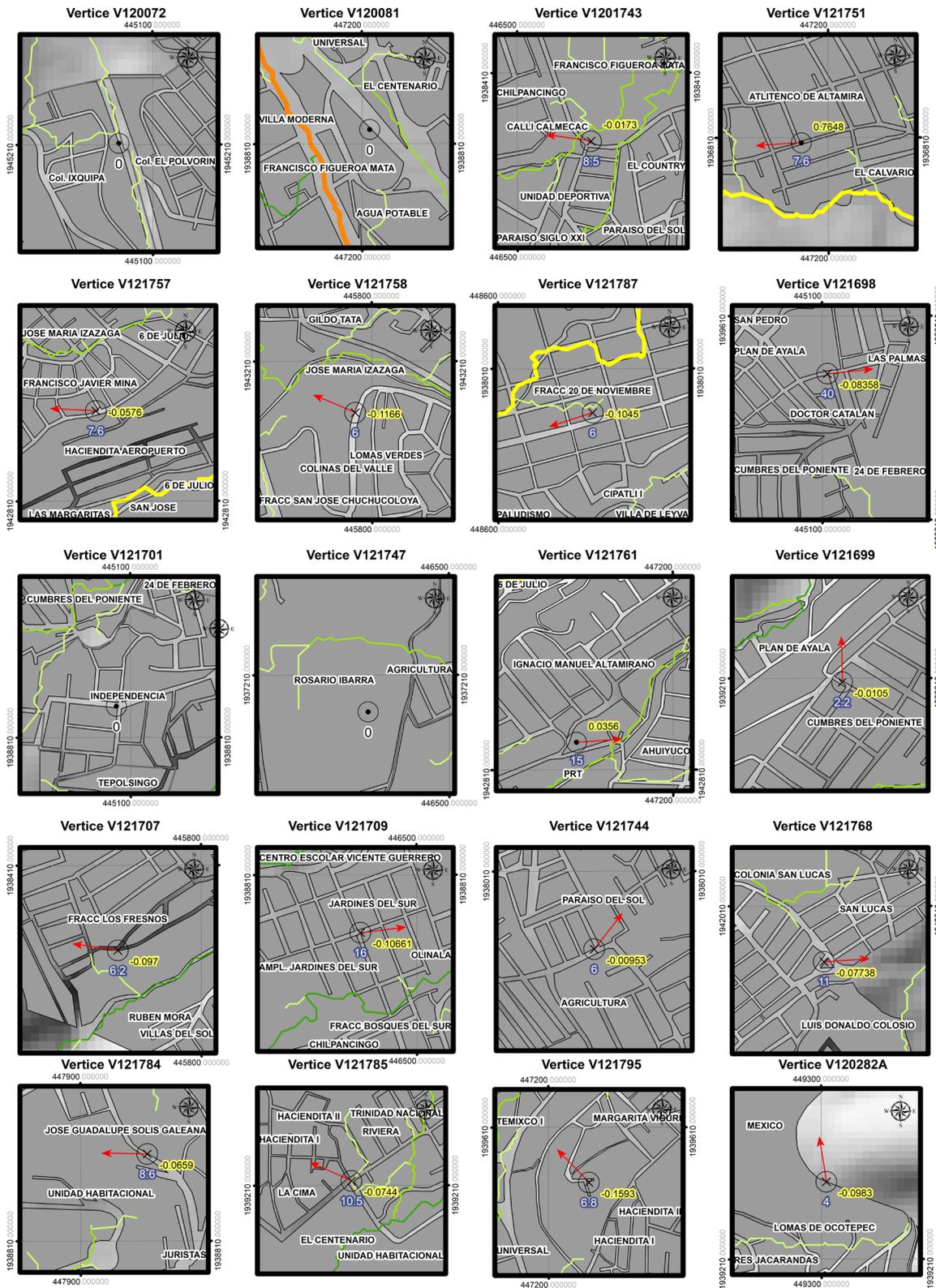


Figura 4. Intensidad, desplazamiento y dirección de los movimientos corticales presentes en la ciudad de Chilpancingo, Guerrero.

Discusión

El desarrollo de herramientas que orienten la toma de decisiones en la gestión de riesgo de desastre geológico-geomorfológico son una novedad para el cumplimiento del objetivo de desarrollo sostenible 11, centrado en el aumento de la resiliencia de las ciudades (Biswas et al., 2022). Sin embargo, para el caso de estudio, son limitados, centrándose en el análisis morfotectónico regional de la Sierra Madre del Sur (Hernández et al., 1995) o de las zonas marginales a la subducción (Gaidzik & Ramírez-Herrera, 2016; Ramírez-Herrera & Urrutia-Fucugauchi, 1999), así como en aspectos técnicos de estimación sísmica o prospección (Gama et al., 2010). Debido a la complejidad del relieve de la Ciudad de Chilpancingo, se hace necesario recurrir a un análisis detallado de la configuración de sus vertientes, de la energía del relieve y de la diversidad de pendientes en donde el crecimiento urbano desordenado acrecienta la vulnerabilidad (Nuñez-Carachure et al., 2023).

La aproximación de análisis morfoestructural es una propuesta complementaria, ya que se orienta a una prospectiva del territorio en análisis a través de los criterios geomorfológicos, donde no solo basta con la diferenciación de los paisajes (Carbajal et al., 2010), sino que requiere el entendimiento de las relaciones entre sismicidad, bloques y movimientos estructurales (Figueiredo et al., 2019). Estos elementos son determinantes para el estudio de la génesis, evolución y dinámica de territorios altamente vulnerables a la sismicidad como lo es donde se ubica la Ciudad de Chilpancingo.

Sin embargo, debido al carácter descriptivo de la aproximación geomorfológica, se hace necesario comprobar la dinámica tectónica y, para ello, se recurre al análisis de los resultados del monitoreo de redes geodésicas con la tecnología GNSS Leica GS15, esta técnica ya fue propuesta por Espinoza-Rodríguez et al. (2016) quienes reconocieron movimientos verticales de 0.4 a 0.5 mm/año para la zona de Acambay, y que son menores a los reportados en este estudio (los máximos verticales para la ciudad de Chilpancingo oscilan de 0.0 a 11.0 cm/año).

Conclusión

El análisis morfoestructural es una herramienta básica en la gestión de riesgo de desastre para ciudades altamente vulnerables a sismicidad, sobre todo ante la carencia de estaciones sísmicas, que permite zonificar el territorio de acuerdo con sus propiedades morfológicas de altitud, energía del relieve, pendientes y configuración fluvial.

Es necesario la actualización del atlas de riesgo de la Ciudad de Chilpancingo, Guerrero, en el marco de la agenda 2030 y de los ODS, en especial, del ODS 11 que busca la resiliencia ante riesgos. En específico, es importante integrar los peligros de carácter sismo-tectónico, donde el análisis geomorfológico estructural puede auxiliar el reconocimiento de la génesis, evolución y dinámica tectónica de la ciudad.

Finalmente, la dinámica neotectónica se pone de manifiesto al registrar movimientos verticales de hasta 11 cm/año, lo que revela la alta vulnerabilidad a la sismicidad de sectores de la ciudad.

Para avanzar en la contribución a los ODS de la agenda 2030 y lograr que los asentamientos humanos sean seguros, resilientes y sostenibles, en el marco de la reducción de riesgo de desastres de origen geológico, es esencial comprender el marco geomorfológico regional. En ese sentido, los hallazgos obtenidos sugieren la elaboración del diseño morfoestructural de bloques morfotectónicos que muestren el contexto geodinámico regional en que se posiciona la ciudad de Chilpancingo, para ser incorporados en los procesos de planificación territorial y desarrollo urbano. De esta manera se logra orientar hacia un crecimiento sostenible y resiliente frente a las amenazas naturales de origen geológico.

Referencias

- Arnous, M.O., Hegazi, A.M., El-Rayes, A.E., & Almoazamy, A.A. (2023). Identification of geomorphic signatures of active tectonics in the Wadi Hagul Basin, Northwest Gulf of Suez, Egypt: insights from SRTM derived geomorphic indices and watershed analysis. *Journal of Coastal Conservation*, 27(40), 27-40. <https://doi.org/10.1007/s11852-023-00973-9>
- Barba, P., Pérez-Méndez, N., Ramírez-Zelaya, J., Rosado, B., Jiménez, V., & Berrocoso, M. (2023). Geodynamic Modeling in Central America Based on GNSS Time Series Analysis—Special Case: The Nicoya Earthquake (Costa Rica, 2012). *Engineering Proceedings*, 39(1), 84. <https://doi.org/10.3390/engproc2023039084>
- Berné Valero, J. L., Anquela Julián, A. B., & Garrido Villén, N. (2014). GNSS. GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática. *Colección Académica. Editorial UPV*.
- Biswas, M., Manash, P.G., Bikramaditya, M., Thota, S., Soumyajit, M., & Swagato, D. (2022). Geomorphic assessment of active tectonics in Jaisalmer basin (Western Rajasthan, India), *Geocarto International*, 37(26), 12382-12413. <https://doi.org/10.1080/10106049.2022.2066726>
- Carbajal, J.C., Hernández, J.R., & Bollo, M. (2010). Paisajes físico-geográficos del Circuito Turístico Chilpancingo-Azul, estado de Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas*, (73), 71-85. <https://doi.org/10.14350/rig.23863>
- Carreto, J.A. (2022). *Geomorfología estructural y técnicas geodésicas en la región de Chilpancingo, Gro.* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Guerrero.
- Comisión Federal de Electricidad. (1993). Manual de Diseño de Obras Civiles. CFE.
- Centre for Research on the Epidemiology of Disasters. (2023). *Natural Disasters 2022*. CRED.
- Espinosa - Rodríguez, L. M., Hernández - Santana, J. R., & Méndez - Linares, A. P. (2016). Evidencia geodésica de movimientos verticales recientes en la zona sismogeneradora de Acambay, México. *Minería y Geología*, 32(4), 91-109.
- Figueiredo, P.M., Rockwell, T.K., Cabral, J., & Ponte, C. (2019). Morphotectonics in a low tectonic rate area: Analysis of the southern Portuguese Atlantic coastal region. *Geomorphology*, 326, 132-151. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.02.019>
- Gaidzik, K. & Ramírez-Herrera, M.T., (2016). Geomorphic indices and relative tectonic uplift in the Guerrero sector of the Mexican forearc. *Geoscience Frontiers*, 8(4), 885-902. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsf.2016.07.006>
- Gama, A., Gómez, A., & Aguirre, J. (2010). Amplificación sísmica de Chilpancingo, Guerrero. *Revista Digital Universitaria*, 11(1), 1-14.
- Gobierno del Estado de Guerrero. (2009). *Identificación geotécnica de laderas potencialmente inestables en las cabeceras municipales de Chilpancingo, Tlapa, Zihuatanejo, Taxco y Acapulco*. Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil.
- Gupta, S. & Biswas, M. (2023). Seismo-tectonic and morphological study of the north-east Himalaya. *Geosciences Journal*, 27, 1-21. <https://doi.org/10.1007/s12303-022-0016-z>
- H. Ayuntamiento constitucional de Chilpancingo de los Bravo. (2018). *Plan municipal de desarrollo 2018-2021*. <http://chilpancingo.gob.mx/>

Hernández, J.R., Ortiz, M.A., & Zamorano, J.J. (1995). Regionalización morfoestructural de la Sierra Madre del Sur, México. *Investigaciones Geográficas*, (31), 45-67.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2010). Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica. Inegi.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). *Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)*. <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2015). *Guía metodológica de la red geodésica horizontal*. Inegi.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). *Carta topográfica [E14C28e]. 1:20,000. Chilpancingo, Guerrero*. Inegi.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2020). *Censo de población y vivienda*. Inegi.

Instituto de Geofísica. (2012). *Reporte del sismo del día 15 de noviembre de 2012, Guerrero* (M 6.1). Geofísica-UNAM

Lugo, H. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada*. Universidad Nacional Autónoma de México.

Núñez-Carachure, E., Frausto-Martínez, O., & Villaseñor-Franco, A. (2023). Perfiles geomorfológicos complejos aplicados en las subcuencas de los ríos Huacapa y Huajapa, Guerrero, México. *Boletín de ciencias de la tierra*, 53, 49 - 56. <https://doi.org/10.15446/rbct.n53.103641>

Olaya, V. (2014). *Sistemas de información geográfica*. <https://volaya.github.io/libro-sig/>

Organización de las Naciones Unidas. (2023). *The Sustainable Development Goals Report 2023: Special Edition*. United Nations.

Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres. (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres. 2015-2030*. UNDRR.

Pánek, T. (2004). The use of morphometric parameters in tectonic geomorphology (on the example of the Western Beskydy Mts). *Acta Universitatis Carolinae, Geographica*, (1), 111-126.

Panizza, M., (1987). Geomorphological hazard assessment and the analysis of geomorphological risk. En V. Gardiner (Ed.), *International Geomorphology 1986* (pp. 225-229, part 1). Wiley.

Ramírez-Herrera M.T., Gaidzik, K., & Forman S.L. (2021). Spatial Variations of Tectonic Uplift - Subducting Plate Effects on the Guerrero Forearc, Mexico. *Frontiers in Earth Science*, 8, 573081. <https://doi.org/10.3389/feart.2020.573081>

Ramírez-Herrera, M.T. & Urrutia-Fucugauchi, J. (1999). Morphotectonic zones along the coast of the Pacific continental margin, southern Mexico. *Geomorphology*, 28(3-4), 237-250. [http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X\(99\)00016-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0169-555X(99)00016-1)

Servicio Geológico Mexicano (2006). *Carta geológica*. <https://www.sgm.gob.mx/CartasPdf/Geologicas.jsp>

Servicio Sismológico Nacional. (2021). Catálogo de sismicidad en Mexico 1900 - 2021. Instituto de Geofísica, UNAM. <http://www.ssn.unam.mx:8080/catalogo/>

Fotogrametría como metodología de monitoreo de daños en estructuras civiles por subsidencias en la CDMX

Gabriela Vidal García ^a

Nelly Lucero Ramírez Serrato ^b

Ana María Lizeth Caballero García ^c

Mariana Patricia Jácome Paz ^b

Graciela Herrera Zamarrón ^b

Fabiola Doracely Yépez Rincón ^d

Néstor López Valdés ^e

Facultad de Ingeniería, UNAM ^a

Departamento de Recursos Naturales,
Instituto de Geofísica, UNAM ^b

Facultad de Ciencias, UNAM ^c

Facultad de Ingeniería Civil, UANL ^d

Dirección General de Atención
a la Comunidad, UNAM ^e

La subsidencia es un proceso natural e irreversible que actúa de forma gradual sobre la superficie terrestre en un área extensa, causando variaciones negativas en la vertical, es decir, hundimiento, y que fluctúa en un orden de magnitud de milímetros a centímetros al año. A su vez, este fenómeno puede intensificarse con respecto a la escala de tiempo y desarrollarse de forma acelerada, debido a procesos detonantes como lo es la actividad antropogénica, particularmente asociada a la extracción de fluidos como agua e hidrocarburos (Corapcioglu, 1984).

Ahora bien, existen diversas aproximaciones para abordar el estudio de la subsidencia, así como clasificaciones, tal es el caso de Prokopovich (1979), que realiza una aproximación desde la naturaleza del fenómeno y del lugar donde tiene su origen y propone una clasificación en dos grupos: endógeno (procesos geológicos subterráneos) y exógeno (compactación de la cobertura superficial del suelo). Por su parte, Scott (1979) propone una clasificación de acuerdo con los mecanismos que lo desencadenan, mientras que González de Vallejo et al. (2002) hacen lo propio desde las causas que lo originan. Finalmente, Tomás-Jover et al. (2009) presentan una clasificación de acuerdo con las causas de origen, delimitando el marco de desarrollo en seis causales: disolución subterránea, construcción de obras subterráneas o galerías mineras, erosión subterránea (tubificación o piping), flujo lateral, compactación y tectónica. Lo que lleva a considerar la existencia de distintos tipos de hundimiento, es decir de subsidencias.

Las subsidencias son un peligro que debe tomarse en cuenta, si bien el número de fatalidades asociado a ellas es muy bajo, los daños económicos que generan pueden ser muy elevados, principalmente en zonas urbanizadas o en donde existe un importante despliegue de infraestructura crítica.

Las deformaciones verticales del terreno, así como los cambios morfológicos que producen las subsidencias han sido ampliamente estudiados mediante diferentes técnicas como los Sistemas de Posicionamiento Global o GPS (Zhao & Zhu, 2020), los levantamientos LIDAR (Light Detection and Ranging), ya sean aéreos o terrestres (Yu et al., 2011), e interpretación de interferogramas diferenciales (Ferguson et al., 2015). Con dichas técnicas, pueden compararse los resultados de dos escaneos del mismo sitio en diferentes tiempos (Zuo et al., 2019).

En la megalópolis de Ciudad de México (CDMX), estudios recientes han usado algunas de las metodologías mencionadas para determinar cuáles son las zonas que presentan subsidencia, resaltando la parte noroeste de la ciudad con una subsidencia de hasta 40 cm/anuales hacia el estado de México (Chaussard et al., 2021) y la parte cercana a Xochimilco (cerca del área de este estudio) con subsidencias de hasta 10 cm/anuales.

Hasta el momento se ha estudiado el problema de la CDMX desde un punto de vista regional (p. ej. Fernández-Torres et al., 2020), sin embargo, se podría dar un mejor seguimiento a las subsidencias y corroborar su velocidad, desarrollando más trabajo a escala local. De esta manera, se logra tener un mejor entendimiento de posibles daños en las estructuras civiles que pudieran ser ocasionados por las subsidencias, y aunque muchos de los deterioros y daños en las estructuras podrían ser visibles, la inspección en una primera etapa o línea base ayudaría a corroborar su evolución.

Cabe mencionar que, en la CDMX, se han identificado zonas con daños que pueden ser atribuibles a subsidencias preexistentes. Se considera que muchos de ellos se intensificaron después del sismo del 19 de septiembre de 2017 (Carreón-Freyre et al., 2017). Aunado a eso, algunas de la ciudad enfrentan el problema de inundaciones de manera recurrente y la presencia de diversas fracturas y socavones en el pavimento de las calles, como es el caso de la localidad Villa Coapa del municipio de Tlalpan, donde se centra esta investigación.

Objetivo

El objetivo de este trabajo es probar una metodología, basada en fotogrametría, para levantamientos 3D georreferenciados, mejor conocidos como “nubes de puntos”, de estructuras civiles y del terreno, tomados en dos momentos, para crear una base de datos homologada que permita hacer comparaciones, para monitorear, caracterizar y cuantificar los daños ocasionados por los procesos de subsidencias.

Área de estudio

La zona de estudio se encuentra al noreste de la delegación Tlalpan, muy cercana a su límite con Xochimilco. Como antecedentes se tienen registrados varios desbordamientos del Río San Buena Aventura (1.5 km al sureste de la zona de estudio) e inundaciones por precipitaciones extremas (López, 2021).

En particular, el estudio se centra en dos edificios (Figura 1). Uno de ellos nombrado Palomares, en la porción derecha del mapa, fue reconstruido recientemente sobre su anterior versión, ya que sufrió daños considerables después del sismo de 2017 (Figura 2). El otro, el edificio Salmón, se ubica en la esquina entre las calles Cebadales y Cerezos en la porción izquierda del mapa. Este último se muestra en la Figura 3.

Figura 3. Edificio Salmón.



Metodología

La caracterización del área de manera regional se realizó por medio de datos GPS de las estaciones de monitoreo de Nevada Geodetic Laboratory (Figura 4). A partir de estos datos se realizó un análisis temporal de los cambios en la componente vertical de cada una de las estaciones. Esto permitió obtener un índice de cambio regional con el que se realizó una interpolación (basada en la ponderación del inverso de su distancia, IDW por sus siglas en inglés) entre estaciones. Con esto podemos conocer el índice de cambio en la zona.

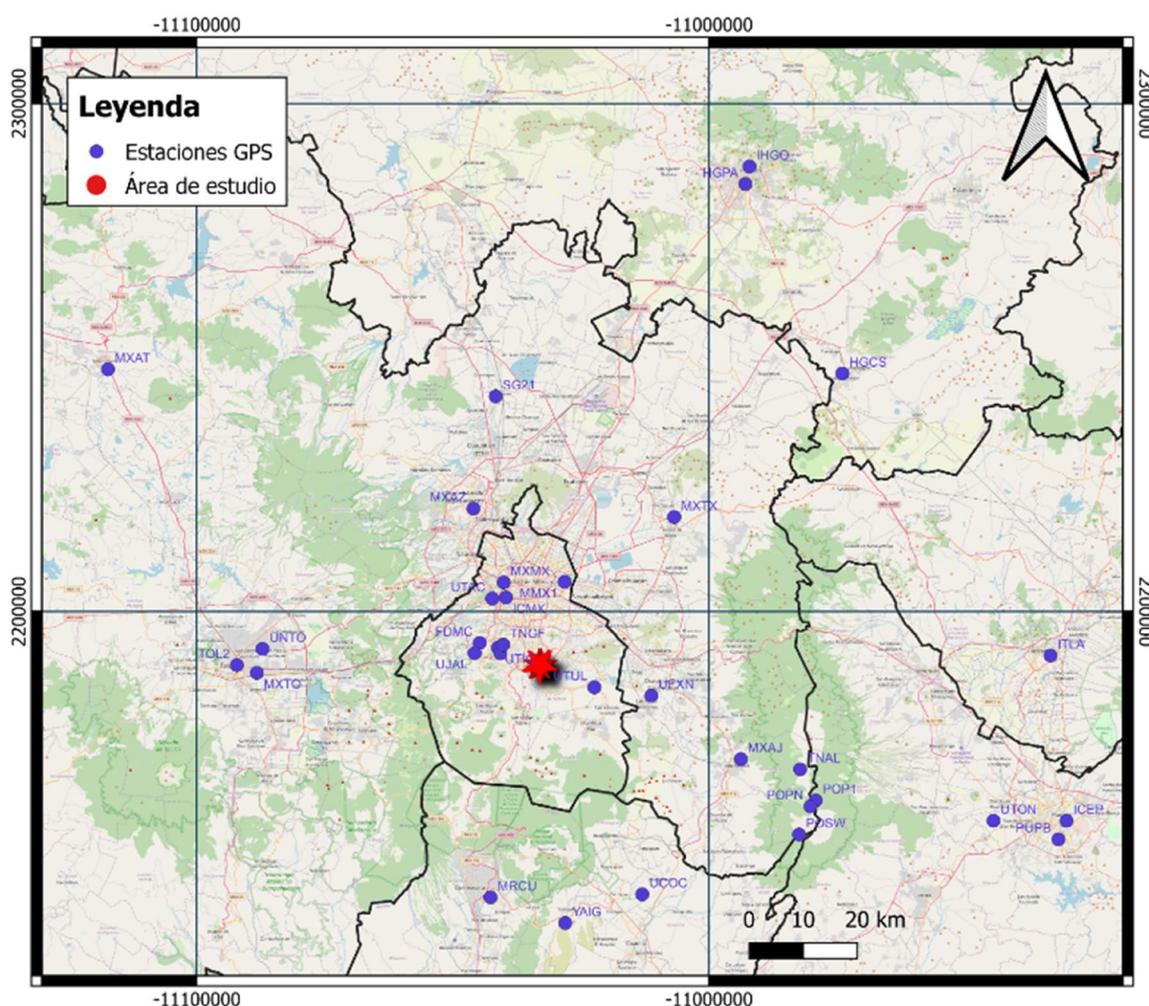


Figura 4. Ubicación de las estaciones de monitoreo GPS.

Una vez realizada la caracterización del área, se adquirió la fotogrametría. El proceso inició a partir de la toma de fotografías desde diferentes perspectivas sobre el punto de interés con el objetivo de obtener una reconstrucción 3D del mismo.

La toma de fotografías se realizó en dos momentos temporales: en abril de 2021 y en enero de 2022. La adquisición de 2021 se realizó con un teléfono celular de gama media

(Moto G6 plus) que cuenta con dos cámaras incorporadas en la parte trasera (de 12 y 5 MP) que funcionan de manera dual; mientras que la adquisición de 2022 también incluyó un levantamiento con drones (Anafi de Parrot, con cámara 4K HDR de 21 MP y un Phantom 4 pro con cámara de 20 MP) donde se obtuvieron fotografías del vuelo en malla y de manera complementaria el vuelo circular a los edificios de interés.

Las fotografías se obtuvieron calculando una superficie de traslape de al menos 70% entre ellas. El método fotogramétrico consiste en la delimitación de puntos de interés por fotografía, la ubicación de estos puntos en el espacio con respecto al sensor por cada par de fotografías, la eliminación de los puntos duplicados y posterior relleno de puntos para obtener la nube densa (para mayor detalle consultar a Huerta-García et al, 2018).

Para obtener las nubes de puntos se utilizaron dos softwares diferentes, uno comercial (Agisoft de Photoscan) y uno de libre acceso (Meshroom), para comparar su potencial. Posteriormente, se filtraron las nubes para eliminar los puntos creados a partir del ruido en las fotografías y se georreferenciaron a partir de puntos de control GPS-RTK. Adicionalmente, se obtuvieron mediciones finales a partir de la comparación de la nube de puntos filtrada y rectificadas con la medida obtenida de la nube de puntos sin procesar. Esto dio como resultado una muestra de la estructura de los edificios, y mediante la validación de campo, se logró identificar qué tan acercado es el valor métrico con respecto a mediciones tomadas de manera tradicional (con una cinta métrica).

Resultados

El resultado de la caracterización regional con base en los datos obtenidos de las estaciones de monitoreo del Nevada Geodetic Laboratory fue un mapa que presenta el índice del cambio del terreno en la componente vertical (Figura 5). Las áreas negras representan hundimiento y, las áreas blancas son donde hay mayor cambio en la pendiente.

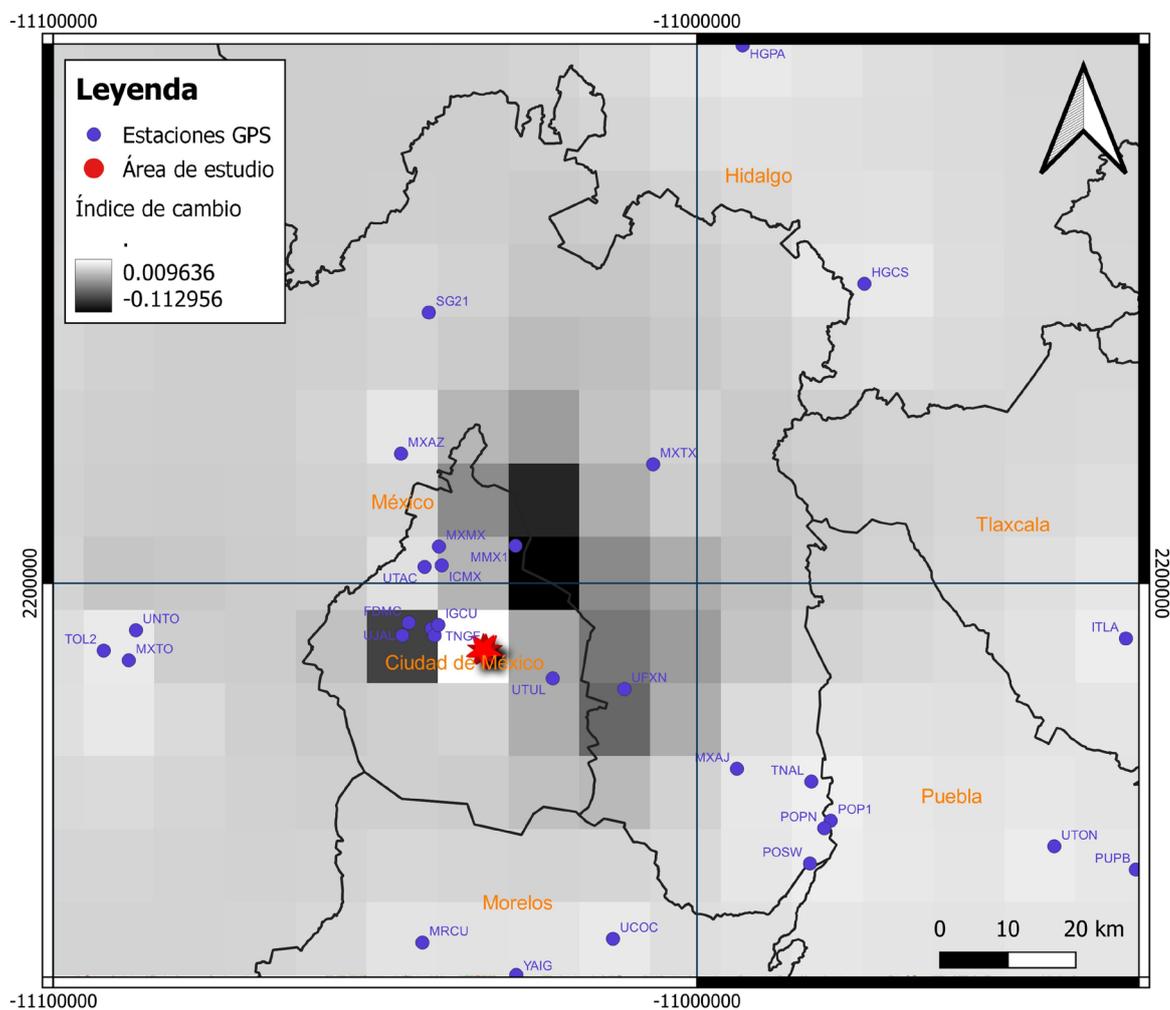


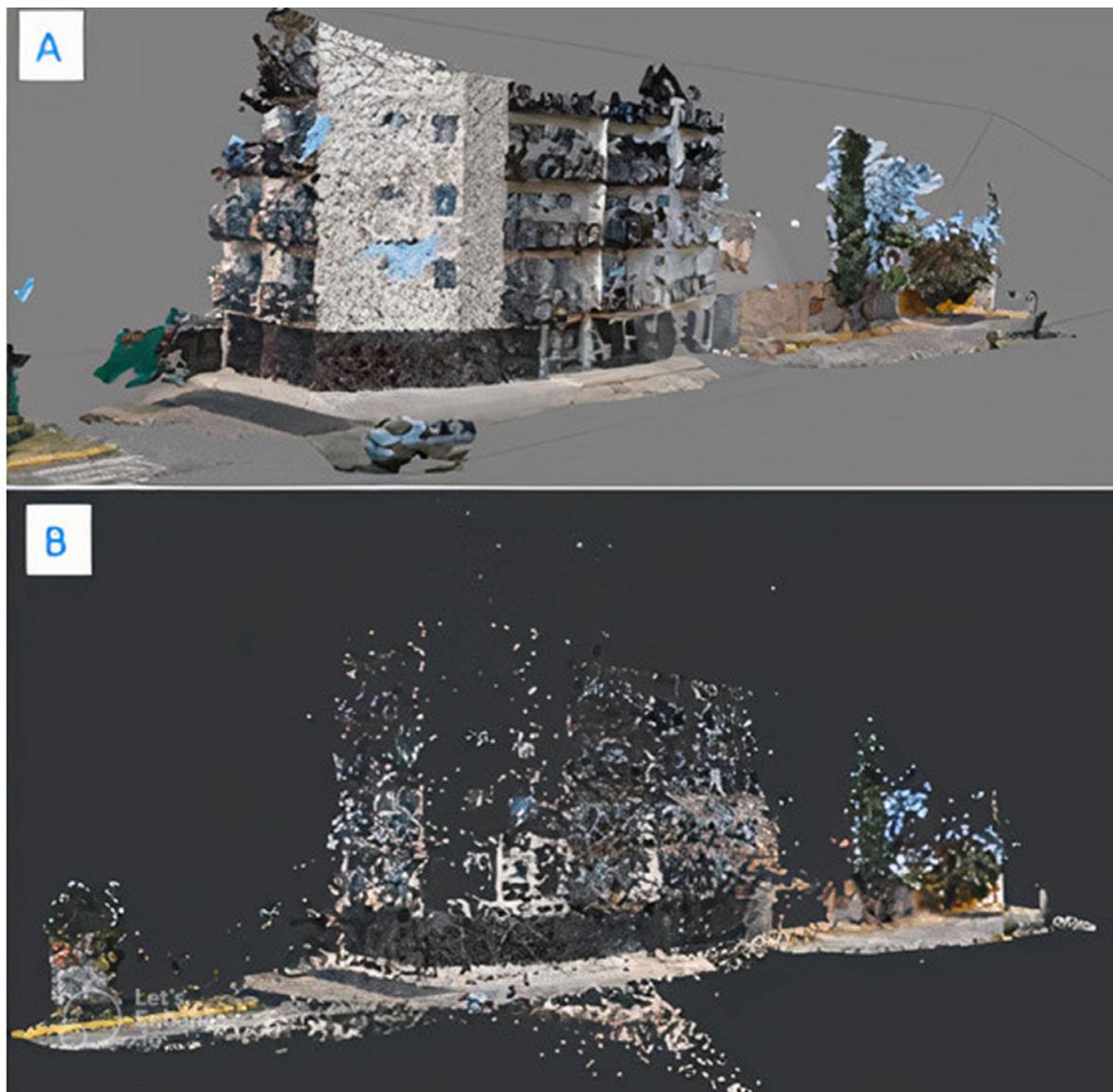
Figura 5. Mapa de interpolación de las variaciones en la pendiente del suelo.

Se obtuvieron dos modelos 3D, uno con cada software utilizado. Esto permitió comparar la cantidad de puntos que calculó y generó cada software para la creación de la nube de puntos (Tabla 1 y Figura 6).

Software	Número de fotografías	Número de puntos generados
Agisoft	87	2,271,777
Meshroom	87	41,906

Tabla 1. Comparación de los valores obtenidos en las nubes de puntos para el edificio Palomares.

Figura 6. Nubes de puntos de la reconstrucción 3D del edificio Palomares. A) Nube de puntos generada en Agisoft. B) Nube de puntos generada con Meshroom.



Se obtuvieron los modelos 3D para los edificios en 2021 y 2022. Se midieron en el modelo puntos inalterables temporalmente en el edificio real con el fin de conocer la precisión del software calculando medidas. Las mediciones se realizaron sobre elementos aleatorios que pudieran ser inalterables en el tiempo, como lo es el portón del edificio, cuyo material no es maleable. Algunos ejemplos de mediciones para el edificio Palomares se muestran en la Figura 7 y para el edificio Salmón en la Figura 8. El compilado de mediciones en campo y su comparación con lo obtenido a partir de las nubes de puntos de 2021 y 2022 se muestran en la Tabla 2 y la Tabla 3.



Tomadas en campo.



2021



2022

Figura 7. Ejemplo de medición manual y a través de las nubes de puntos de la reconstrucción 3D del edificio Palomares con fotografías de 2021 y 2022 para comparación.

Medición (m)	En campo	2021	2022
1	0.52	0.46	0.22
2	1.47	1.20	0.57
3	2.345	1.58	0.92
4	1.775	1.10	0.67

Tabla 2. Medidas obtenidas en el edificio Palomares.

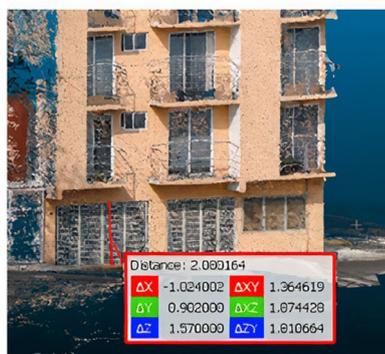
Figura 8. Ejemplo de medición manual y a través de nubes de puntos de la reconstrucción 3D del edificio Salmón con fotografías de 2021 y 2022 para comparación.



Tomadas en campo.



2021



2022

Tabla 3. Comparación de medidas aleatorias sobre elementos aparentemente inalterables, obtenidas en el edificio Salmón.

Medición (m)	En campo	2021	2022
1	0.425	0.54	0.49
2	1.89	2.17	2.080
3	2.32	2.39	2.36
4	1.16	1.25	1.19
5	3.21	3.42	3.28
6	3.21	3.68	3.33
7	2.26	2.54	2.47

Discusión

Los edificios que se utilizaron como base para este estudio tienen una historia compleja, pues se sabe con anticipación que uno de ellos (Salmón) presenta una inclinación, la cual puede ser observada a simple vista. La inclinación está hacia su lado sur. Mientras que el edificio Palomares, está construido sobre su antecesor, el cual tuvo que ser demolido por presentar daños previos (Secretaría de Obras y Servicios, 2018). La reconstrucción 3D obtenida por fotogrametría de los edificios, conserva la escala del entorno real, por lo que es posible, registrar ángulos y elementos representativos, como ventanas, protectores, etc. Visualmente ambas nubes son útiles para la representación del problema, ya que fue posible ver y medir la inclinación del edificio Salmón, así como registrar agrietamiento en el pavimento cercano al edificio Palomares.

Para este experimento se tomaron medidas sobre elementos inalterables en el tiempo, que pueden usarse como referencias (como lo es la dimensión del portón), y con los cuales visualmente pueden observarse cambios en su posición, pero que teóricamente deben tener las mismas dimensiones. Ambas medidas se tomaron en años diferentes, pero en el mismo mes, por lo tanto, se descartaron los cambios que pueden deberse a expansión o contracción de los elementos debido a la temperatura.

En el caso del edificio Palomares, solo se utilizaron cámaras de celular, y la precisión en el tiempo varía más de un metro entre las tomas de 2021 y 2022 con respecto a lo obtenido en campo. Mientras que las diferencias obtenidas con el levantamiento fotogramétrico son de 60 cm, por lo que se consideró que no serían útiles para reconocer los cambios temporales. Sin embargo, los resultados métricos obtenidos en el edificio Salmon son más prometedores, la diferencia entre el dato tomado por metodologías tradicionales y lo obtenido en 2021, varía en un promedio de 0.22 m, en comparación con lo obtenido en 2022 (0.10 m). El promedio de cambio entre lo obtenido en 2021 y 2022 es de 0.11 m. Esto podría sugerir que las mediciones obtenidas con las nubes de puntos utilizadas en este proyecto varían dependiendo de las metodologías implementadas para su procesado, obteniéndose un mejor resultado con el uso de los drones.

Conclusiones

El servicio de peritaje estructural por parte de ingenieros civiles consiste en dar un dictamen técnico del estado en el que se encuentra una estructura, basado en la evaluación del daño observado en la escena, el daño puede presentarse en forma de grietas o inclinaciones de las estructuras, y se requiere de una visita técnica por parte del experto. Por lo que la inspección y evaluación dependerá siempre del usuario. La intención de este proyecto fue demostrar si el entorno digital 3D obtenido mediante procesos fotogramétricos podría ser usado como base para estos expertos dejando una evidencia digital que puede preservarse, aun después de finalizada la existencia de la estructura.

La experimentación con nuevas tecnologías es importante para hacer más eficientes los procesos que actualmente se utilizan para obtener un mismo resultado. En este caso, se compararon dos softwares que procesan imágenes digitales para la obtención de un

modelo fotogramétrico, evidenciando la completitud y avance del software comercial contra el de acceso libre. Si bien la utilidad de estas nubes de puntos depende del objetivo inicial de su desarrollo, el software comercial permite una toma de medidas y ángulos acorde a lo necesario para poder realizar un estudio métrico de desplazamientos. Por otro lado, se comparó también la toma de fotografías sin estructura a partir de teléfonos celulares con cámara, contra lo obtenido mediante vuelos programados de dron, lo que generó los mejores resultados.

Finalmente, aunque durante la elaboración de este estudio se evidenció la utilidad de las técnicas fotogramétricas como un apoyo visual para la representación del daño sobre las estructuras, aun no queda claro si podrá usarse como un reemplazo para el registro de las dimensiones del daño, puesto que la diferencia entre las medidas es aún más grande que el cambio del relieve registrado por subsidencias en la zona de estudio. Como trabajo futuro se sugiere analizar los procedimientos de georreferenciación de la nube de puntos puesto que los datos podrían ser mejorados mediante procesamiento en gabinete.

Referencias

- Carreón-Freyre, D., Cerca, M., Gutiérrez-Calderón, R., López-Quiroz, P., Alcántara-Durán, C., González-Hernández, M., & Centeno-Salas, F. (2017). *Posible influencia de la subsidencia y fracturamiento en la Ciudad de México en las construcciones dañadas por el sismo del 19 de septiembre de 2017*. Centro de Geociencias, UNAM.
- Chaussard, E., Havazli, E., Fattahi, H., Cabral-Cano, E., & Solano-Rojas, D. (2021). Over a century of sinking in Mexico City: No hope for significant elevation and storage capacity recovery. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *126*(4), e2020JB020648. <https://doi.org/10.1029/2020jb020648>
- Corapcioglu, M.Y. (1984). Land Subsidence – A. A State-of-the-Art Review. En J. Bear & M.Y. Corapcioglu (Eds.), *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media* (NATO ASI Series, vol. 82, pp. 369-444). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-6175-3_8
- Ferguson, K.C., Rucker, M.L., & Panda, B.B. (2015). Methods for monitoring land subsidence and earth fissures in the Western USA. *Proceedings of IAHS*, *372*, 361-366. <https://doi.org/10.5194/piahs-372-361-2015>
- Fernández-Torres, E.A., Cabral-Cano, E., Solano-Rojas, D., Havazli, E., & Salazar-Tlaczani, L. (2020b). Land Subsidence Risk Maps and INSAR based Angular Distortion Structural Vulnerability Assessment: an example in Mexico City. *Proceedings of IAHS*, *382*, 583-587. <https://doi.org/10.5194/piahs-382-583-2020>
- González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Prentice Hall.
- Huerta-García, R. E., Ramírez-Serrato, N. L., Yépez-Rincón, F. D., & Lozano-García, D. F. (2018). Precision of remote sensors to estimate aerial biomass parameters: Portable LIDAR and optical sensors. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, *24*(2), 219-235.
- López, J. (2021, 15 de junio). Padecen por inundaciones en Iztapalapa, Xochimilco y Tláhuac. *Excelsior*. <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/padecen-por-inundaciones-en-iztapalapa-xochimilco-y-tlahuac/1454734>
- Prokopovich, N.P. (1979). Genetic classification on land subsidence. En: S.K. Saxena (Ed.). *Evaluation and prediction of subsidence: Papers presented and submitted for the International Conference on Evaluation and Prediction of Subsidence* (pp. 389-399). American Society of Civil Engineers.
- Scott, R. F. (1979). Subsidence A Review. En S.K. Saxena (Ed.), *Evaluation and prediction of subsidence: American Society of Civil Engineers, International Conference* (pp.1-25). New York.
- Secretaría de Obras y Servicios. (2018, 31 de marzo). *Finaliza demolición de edificio afectado en Tercera Cerrada de Palomares: Sobse*. Gobierno de la Ciudad de México. <https://www.obras.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/finaliza-demolicion-de-edificio-afectado-en-tercera-cerrada-de-palomares-sobse>
- Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F. (2009). Subsistencia del terreno. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, *17*(3), 295-302.
- Yu, H., Lu, X., Cheng, G., & Ge, X. (2011). Detection and volume estimation of mining subsidence based on multi-temporal LiDAR data. 2011 19th *International Conference on Geoinformatics* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GeoInformatics.2011.5980892>

Zhao, X. & Zhu, Q. (2020). Analysis of the surface subsidence induced by sublevel caving based on GPS monitoring and numerical simulation. *Natural Hazards*, *103*(3), 3063–3083. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04119-0>

Zuo, J., Gong, H., Chen, B., Liu, K., Zhou, C., & Ke, Y. (2019). Time-series evolution patterns of land subsidence in the eastern Beijing Plain, China. *Remote Sensing*, *11*(5), 539. <https://doi.org/10.3390/rs11050539>

Uso y aplicación de los sig en la modelación de redes urbanas de distribución de agua

Hugo Guerra Puente

Víctor Hugo Guerra Cobián

José Luis Bruster Flores

Adrián Leonardo Ferriño Fierro

Fabiola Doracely Yépez Rincón

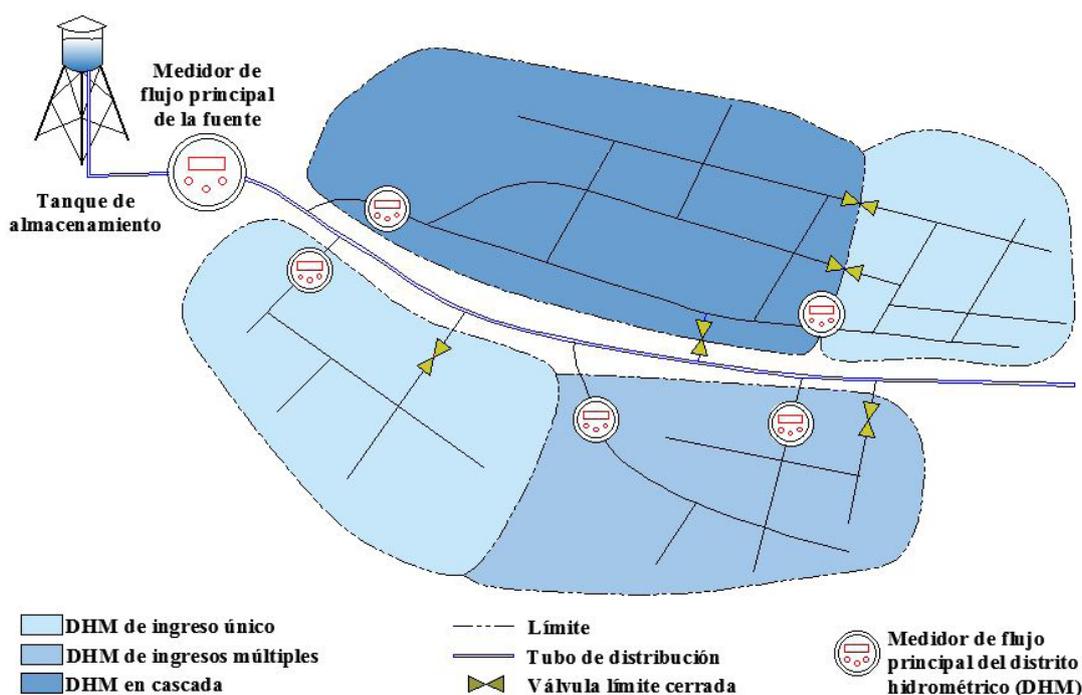
Ricardo A. Cavazos González

Carlos Joel Ábrego Góngora

Universidad Autónoma de Nuevo León

La distribución del agua en la ciudad de Monterrey se realiza a través de una red de tuberías interconectadas entre sí, y su manejo se hace dependiendo de las necesidades de los sectores. Especialmente un Distrito Hidrométrico (DH) pertenece a un sector definido y está formado por una serie de válvulas y equipamientos que permiten aislarlo, cerrando y abriendo estas válvulas, de tal forma que se controlan las demandas de agua de dicho sector (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ], 2011). Un DH se puede crear de varias formas, por ejemplo: desconectando o conectando tuberías y conexiones a las áreas vecinas o abriendo y cerrando las válvulas. Para monitorear el nivel de fugas en un DH, se deben medir los flujos que entran y salen del Distrito Hidrométrico de Medición (DHM) o medidor del DH. Existen distintos tipos de DHM, los cuales se pueden observar en la Figura 1.

Figura 1. Tipos de DHM.



Fuente: GIZ (2011).

Actualmente, es indispensable llevar a cabo las modelaciones hidráulicas de los sistemas de distribución de agua potable mediante programas computacionales y, por lo tanto, tomar las decisiones adecuadas y pertinentes. El uso de estas herramientas computacionales y automatizadas permite obtener de manera casi instantánea los valores de presiones y caudales en función de los parámetros definidos (García, 2006; Fragoso Sandoval et al., 2016; Akpan et al., 2017; Morelos & Hernández, 2017; Galuppini et al., 2019), empleando programas de simulación de redes hidráulicas; además se pueden disminuir los tiempos de cálculo y, a la vez, se obtienen mejores precisiones en los resultados, siempre y cuando, la calibración sea maximizada.

En el caso de las modelaciones hidráulicas que tienen una base de Sistema de Información Geográfica (SIG), es necesario que los elementos introducidos en el modelo estén georreferenciados. Las presiones hidráulicas se calculan basándose en la energía potencial, de presión y de velocidad, por lo que es indispensable contar con las elevaciones sobre el nivel del mar en la que se encuentran establecidos los elementos que conforman la red. En este sentido, los SIG juegan un papel muy importante, ya que facilitan la georreferenciación de los elementos de la red y permiten crear parte de los archivos de entrada a los modelos hidráulicos de forma automatizada.

En esta investigación el trabajo consistió en aplicar las herramientas SIG para generar parte de los archivos georreferenciados con los que se llevó a cabo la modelación de presiones en un DH de la red del Área Metropolitana de Monterrey. Para esto, se utilizó información tipo vectorial y archivos tipo ráster, con lo cual se realizó la implementación de un modelo hidráulico para la simulación del flujo de la red. El departamento de geoinformática del organismo operador de los Servicios de Agua y Saneamiento de Monterrey (SADM) compartió los archivos vectoriales de los elementos que conforman el DH como, por ejemplo: tuberías, intersecciones, válvulas, hidrantes, tanques, delimitaciones de los sectores, zonas de presión de los tanques, medidores, circuitos, predios del distrito, etc. Adicionalmente, se utilizaron Modelos Digitales de Elevación (MDE) en formato ráster para determinar las profundidades y elevaciones de las tuberías y elementos de la red. Asimismo, se estableció un procedimiento paso a paso, utilizando las funciones y/o extensiones de ArcGIS de ESRI, para la creación de los archivos geospaciales utilizados en el modelo hidráulico.

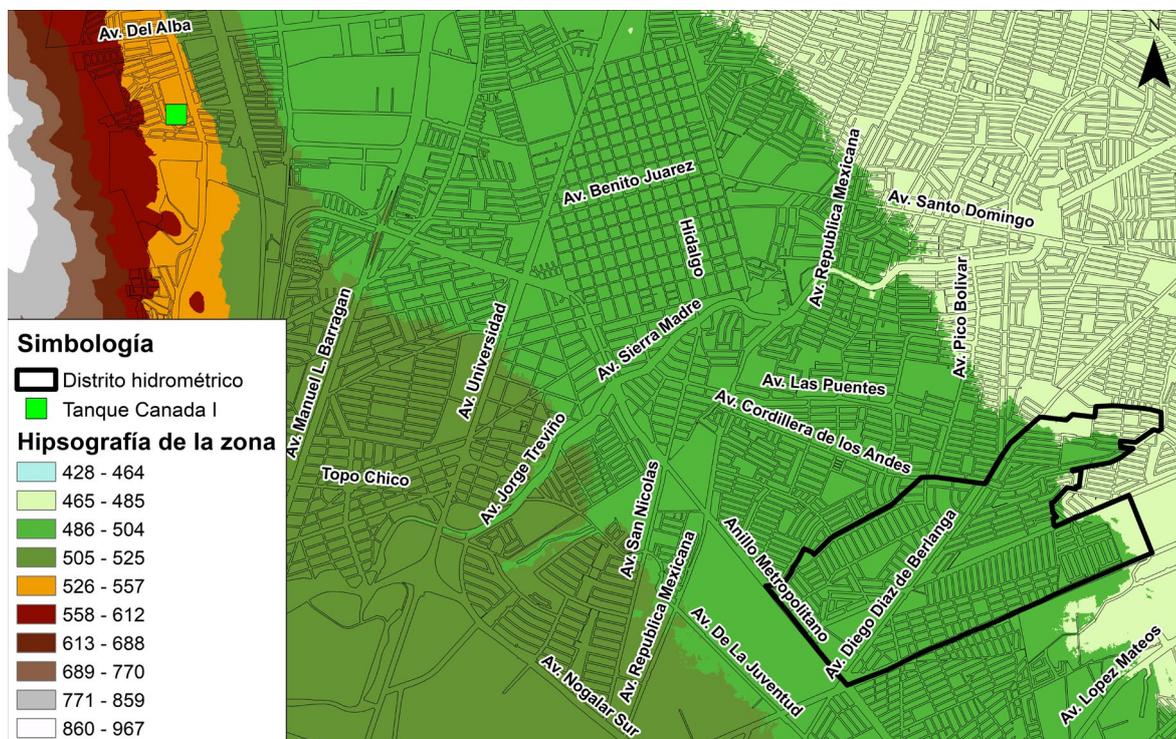
Objetivo

El objetivo consistió en obtener, a través de un modelo con base SIG, parte de los archivos de entrada hacia un modelo hidráulico para posteriormente llevar a cabo la simulación de las presiones hidráulicas en un Distrito Hidrométrico. Los resultados servirán de base para la toma de decisiones en la gestión del DH con el fin de reducir las pérdidas de agua debido a fugas.

Metodología

El primer paso consistió en seleccionar un DH, el cual se ubica en el municipio de San Nicolás de los Garza, Nuevo León, y abarca las colonias: Fuentes de Anáhuac, Jardines de Anáhuac, Pedregal de Santo Domingo y Balcones de Santo Domingo. En estas colonias predomina el tipo de consumo doméstico, y en su mayoría son zonas habitacionales de clase media. Asimismo, se encuentran también algunos usuarios considerados como de uso comercial, industrial y público urbano. Cabe mencionar que el DH es abastecido por el tanque llamado Canadá I, el cual regula el flujo y la presión del DH. La Figura 2 muestra la hipsografía de la zona en estudio a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE), denominada DHM Jardines de Anáhuac.

Figura 2. Hipsografía de la zona donde se ubica el DH en estudio.



Para la obtención de algunos de los parámetros y variables necesarias para efectuar la modelación hidráulica del DH, se utilizó ArcGIS. Se implementó una técnica para obtener las elevaciones de los elementos que conforman la red del DH e introducir estos valores a los nodos que conforman el modelo hidráulico, para posteriormente determinar las presiones hidráulicas en cada uno de ellos (Guerra, 2019).

Las tablas de atributos de los archivos vectoriales de las intersecciones, válvulas y nodos de la red, cuentan con un campo para introducir los datos de elevación de las profundidades a las que se encuentran dichos elementos. Con la herramienta de SIG "Merge" (fusión) se unieron los archivos, creando un nuevo archivo vectorial (Prof_puntos) con los campos de profundidades (Prof) y de identificación (Figura 3). A continuación, se generó una interpolación de dichos puntos para poder obtener las profundidades de toda el área que abarca el distrito, para lo cual se utilizó la herramienta para crear una red de interpolación triangular (TIN, por sus siglas en inglés). Cabe mencionar que los datos de las profundidades obtenidas solo aplican para los tramos de tuberías que forman parte del modelo del DH (Figura 4).

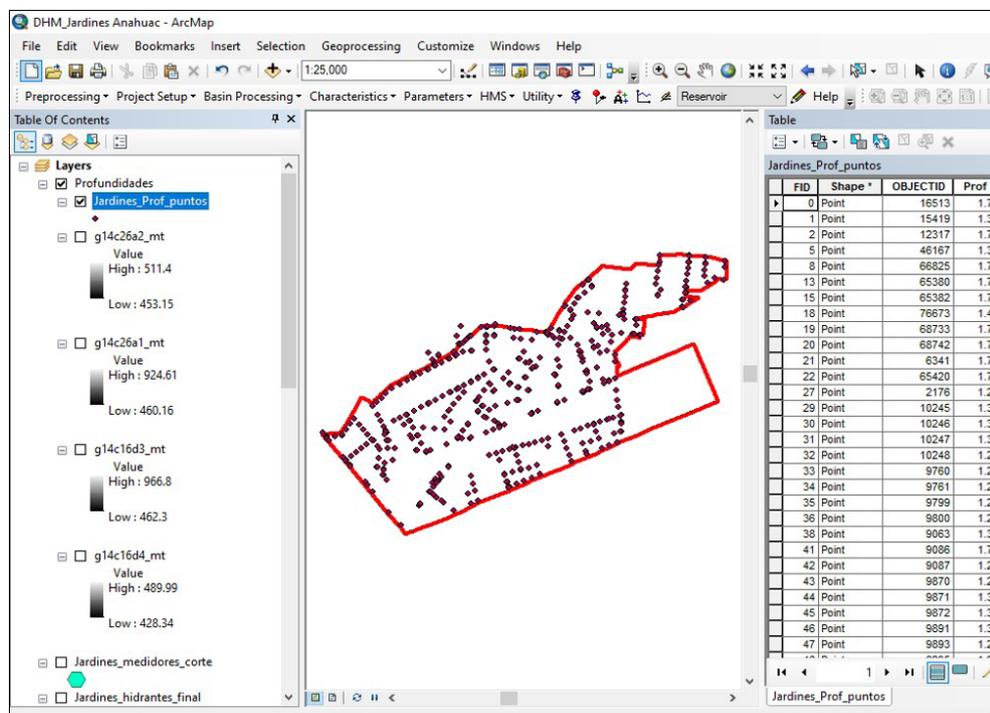


Figura 3. DH con elementos de la red y su tabla de atributos.

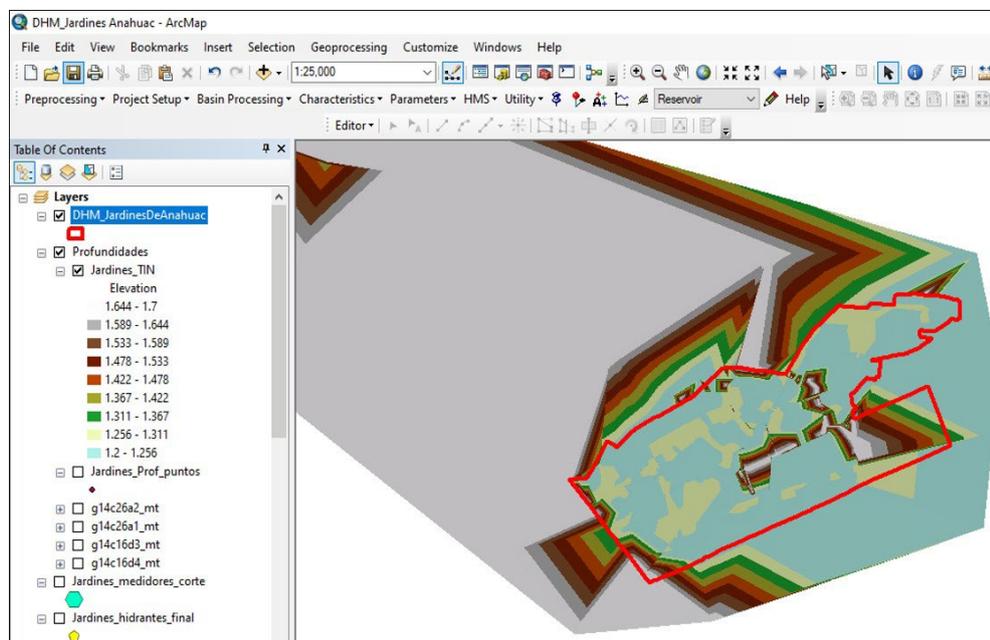
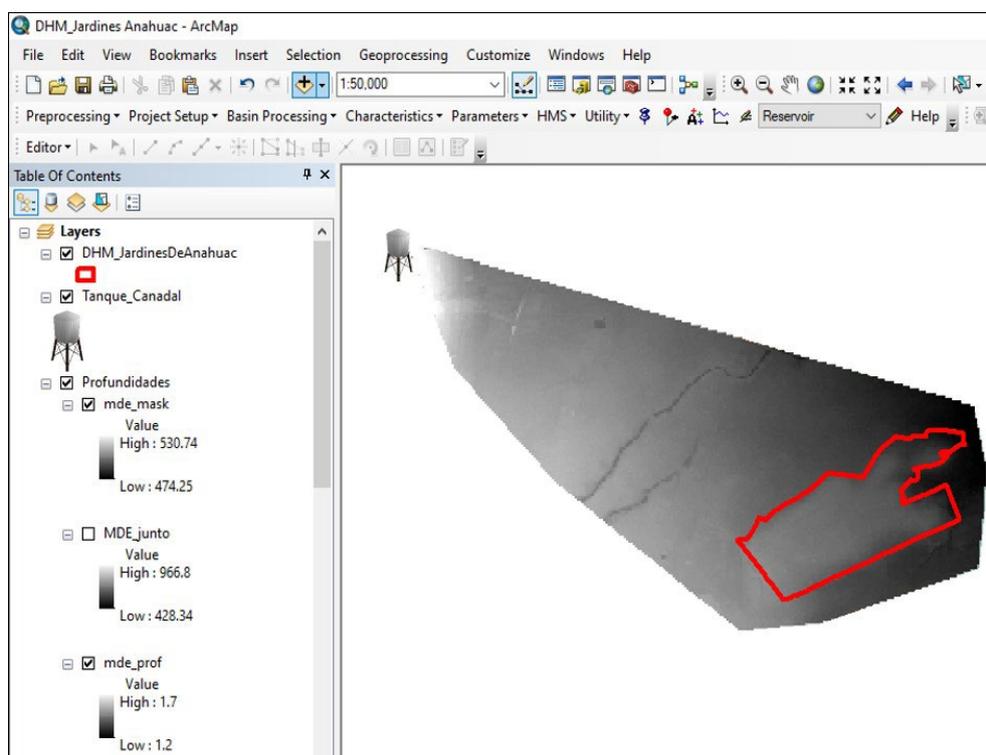


Figura 4. Interpolación de puntos de profundidad de los elementos del DH.

El siguiente paso consistió en convertir el TIN creado a un formato matricial o tipo ráster, ya que este es el mismo tipo de archivo de los modelos digitales de elevación que se utilizarán posteriormente. En este paso se verificó que el tamaño de la celda del ráster creado tuviera el mismo tamaño de píxel de los modelos de elevación, es decir, la misma resolución espacial. El ráster creado se llamó MDE_prof.

La Figura 5 muestra el archivo tipo ráster generado a partir del TIN con la nube de puntos de las profundidades de los elementos que integraran el modelo hidráulico. En ella se observa que las profundidades máxima y mínima a la que se localizan las tuberías del DH con respecto al nivel de rodamiento, son 1.7 m y 1.2 m, respectivamente. Estos valores resultan lógicos, además de que se verificó en campo la profundidad de algunos puntos.

Figura 5. Archivo raster MDE_prof.



Posteriormente, se emplearon modelos digitales de elevación (MDE) de terreno en resolución de 5x5 metros y formato GRID. Los MDE fueron descargados directamente de la plataforma digital del Instituto Nacional de Estadística y Geografía. A partir de ellos se llevó a cabo una extracción del MDE, en m s.n.m., correspondiente a la zona en estudio. De esta forma se obtuvieron los valores de elevación del terreno de las calles del distrito en estudio. El archivo ráster se denominó "MDE_mask".

Después se empleó la calculadora de archivos ráster para realizar algebra de mapas. La operación consistió en restar al ráster MDE_mask el ráster MDE_prof, obteniéndose un nuevo mapa con el mismo formato al que se le llamó MDE_cotas (Figura 7). Este archivo contiene las elevaciones en m s.n.m. de los puntos sobre los cuales se ubica la red de tuberías del modelo hidráulico. Cabe mencionar que el objetivo del proceso anterior fue para contar con las elevaciones estimadas de los nodos, válvulas, cruces, etc. que conforman el DH y son fundamentales para la construcción del modelo hidráulico, ya que de esto depende el cálculo de las presiones en la red.

La metodología utilizada se puede replicar para distintas zonas de estudio o DH, siempre y cuando se cuente con la información vectorial y la de tipo ráster mencionadas en este procedimiento.

Resultados

Después de llevar a cabo la metodología descrita previamente, a partir de la herramienta para la creación de contornos o curvas de ArcMap se obtuvo un archivo tipo vectorial formado por las curvas de profundidades topográficas en metros sobre el nivel del mar, denominado CN_cotas, el cual fue creado a partir del ráster MDE_cotas (Figura 6). Es importante mencionar que el software utilizado para la modelación hidráulica permite ingresar archivos tipo vectorial, para conformar la estructura del modelo y asignarle las profundidades a los nodos que lo integran.

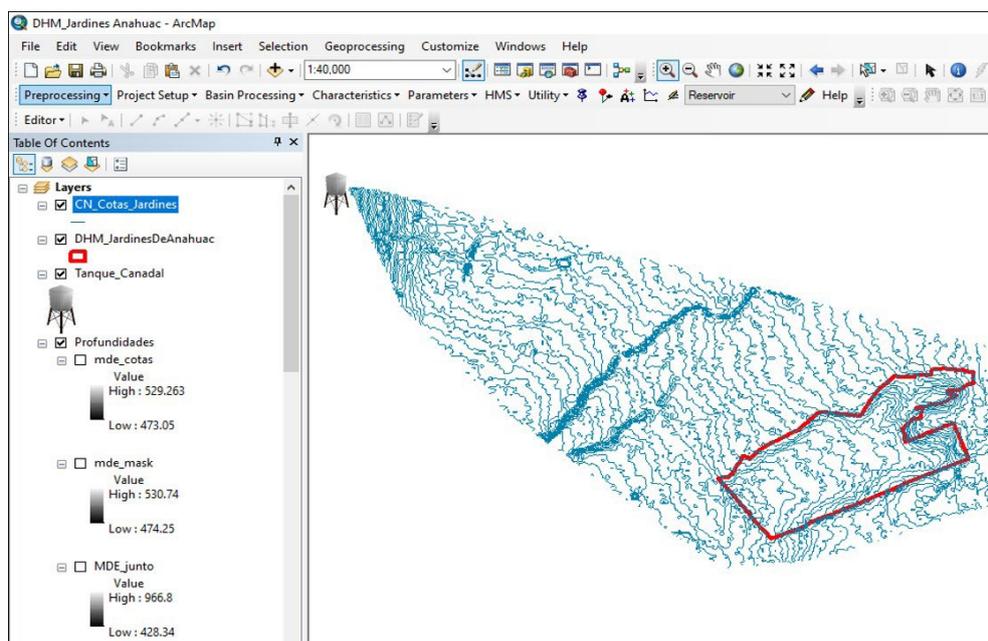
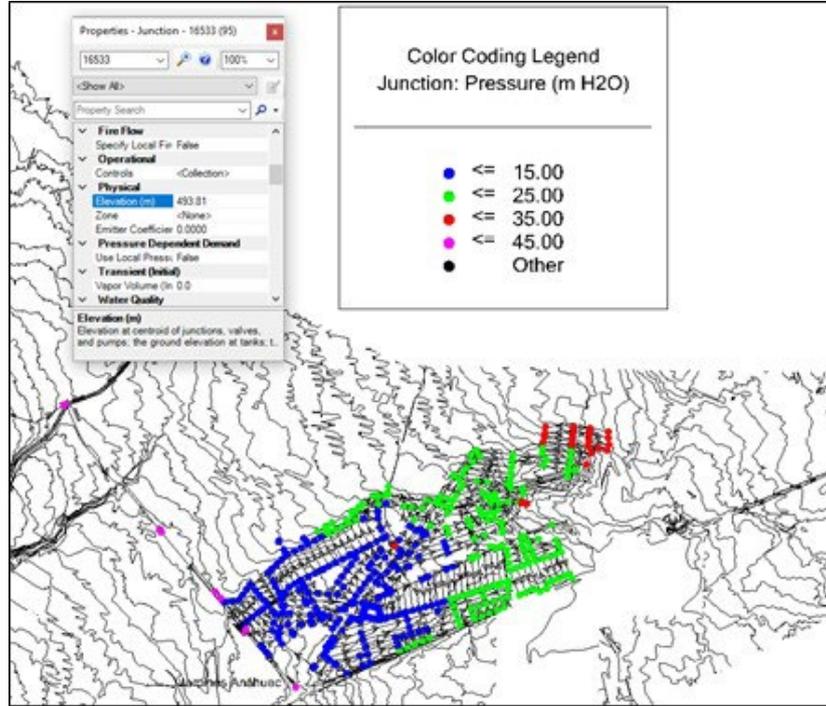


Figura 6. Shape CN_cotas.

En este caso, el archivo tipo vectorial, con las profundidades o cotas de las tuberías y nodos del modelo hidráulico, se ingresó al software WaterCAD de Bentley, utilizando la herramienta TRex, de manera que se le asignaron las profundidades correspondientes a cada nodo. En este software es importante seleccionar la ubicación del archivo tipo vectorial y definir el campo que contiene la información de elevación de la tubería. La Figura 7 muestra el visor del software WaterCAD de Bentley con el archivo tipo vectorial que contiene las profundidades de los nodos y demás elementos hidráulicos del modelo.

Figura 7. Modelo hidráulico en WaterCAD.



Una vez realizada la acción anterior, es importante comprobar que cada nodo del modelo hidráulico tenga asignada la información correspondiente de elevación. En este sentido, se podrá simular y obtener las presiones hidráulicas en cada nodo de manera satisfactoria.

Discusión y conclusión

Los modelos digitales de elevación (MDE) de terreno de 5x5 se ajustaron adecuadamente para poder obtener la elevación estimada de los nodos, válvulas y diversos elementos que formaron el modelo, siendo esta variable una parte fundamental para la construcción del modelo hidráulico. En efecto, los resultados de la implementación de la metodología indicaron valores lógicos, los cuales se comprobaron con visitas a campo y revisiones de registros de agua potable.

Los resultados mostraron que se pueden obtener de forma rápida y automatizada los datos geoespaciales para la implementación del modelo hidráulico, lo cual permitió optimizar los tiempos del preproceso e invertir más tiempo en el proceso de calibración y validación del modelo hidráulico.

De acuerdo con la metodología y los resultados presentados se puede afirmar que los SIG son una herramienta indispensable para la implementación de modelos hidráulicos, ya que facilitan el manejo de grandes cantidades de información en archivos vectoriales o ráster que pueden superponerse o combinarse para el intercambio de datos. Además, el tiempo invertido en el manejo de datos para la implementación del modelo hidráulico se reduce considerablemente, lo que permite administrar mejor los tiempos del proyecto y dirigirlos hacia la calibración y validación del modelo, y optimizar los procesos de las simulaciones.

Si bien los resultados muestran que se pueden obtener de forma rápida y automatizada los datos geoespaciales para la implementación del modelo hidráulico, es recomendable establecer algoritmos que optimicen las fases del proceso, como la creación de un algoritmo para automatizar la obtención de los archivos de entrada al modelo.

Referencias

Akpan, P. U., Jones, S., Eke, M. N., & Yeung, H. (2017). *Modelling and transient simulation of water flow in pipelines using WANDA Transient software*. *Ain Shams Engineering Journal*, 8(3), 457–466. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2015.09.006>

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (2011). *Guía para la reducción de las pérdidas de agua. Un enfoque en la gestión de la presión de la presión*. GIZ, VAG, FHNW y KIT.

Fragoso, L., Ruiz, J., & Toxky, G. (2016). La sectorización en redes de agua potable para mejorar su eficiencia hidráulica. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*, 37(2), 29–43.

Galuppini, G., Creaco, E., Toffanin, C., & Magni, L. (2019). Service pressure regulation in water distribution networks. *Control Engineering Practice*, 86, 70–84. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2019.03.007>

García, M. del M. (2006). *Modelación y simulación de redes hidráulicas a presión mediante herramientas informáticas*. Universidad Politécnica de Cartagena.

Guerra, H. (2019). *Propuesta de reducción de pérdidas en una red de distribución de agua potable mediante la simulación hidráulica de presiones en un macrosector de la red del Área Metropolitana de Monterrey* (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma de Nuevo León.

Morelos, R. A., & Hernández, R. (2017). Modelación hidráulica de la red de distribución de agua potable en una ciudad mexicana. *EPANET. Revista Iberoamericana de Ciencias*, 4 (2), 120.

Valor ambiental-paisajístico del transpatio forestal en el centro de la ciudad de Jiquilpan de Juárez, Michoacán, México

Carlos Arredondo León

Universidad Nacional Autónoma de México

El General Lázaro Cárdenas escribió de su puño y letra notas donde se detallan cómo se realizaron los trabajos de forestación y reforestación de Jiquilpan a lo largo del siglo XX (Cárdenas, 2003). Terminó de preparar dichos apuntes en septiembre de 1970, un mes antes de su fallecimiento, y fueron publicados a su muerte con el nombre de La Alameda de Jiquilpan. Cuando se lee La Alameda de Jiquilpan, el lector se da cuenta que la obra de forestación y reforestación que se hizo en Jiquilpan no fue una tarea fácil para él como promotor, como tampoco para los jiquilpenses convencidos del bienestar que traería la plantación de árboles.

El emplazamiento de la vegetación en los espacios públicos y privados, entre ellos los traspacios de las viviendas, ha sido una forma de participación ciudadana a través de la cual los jiquilpenses no solo mejoran internamente el espacio arquitectónico, sino estrechan lazos familiares de convivencia y sentimientos de pertenencia y empatía, entre ellos y los vecinos más próximos, en tanto que, con la utilidad asociada, dan funcionalidad a las propiedades.

Este proceder no es nuevo, mucho menos propio de esta ciudad del occidente michoacano. Por el contrario, la fórmula estética, higienista, moral e incluso ecológica del proyecto urbano-forestal cardenista de aquel entonces se asemeja a muchas iniciativas que, desde tiempos inmemoriales, han buscado el bienestar y la calidad de vida de la población urbana. Científicamente, por ejemplo, la comunidad coincide al señalar que son muchos los beneficios que la población recibe cuando se incorpora la vegetación en el espacio urbano (público y privado), convirtiéndolo en un nicho verde natural y ambientalmente habitable.

En este orden de ideas, Naranjo (2009) señala que:

El contacto con la naturaleza es una experiencia relajante integral que ayuda a prevenir el estrés. La persona obtiene de la interacción con ella paz y salud. La naturaleza es la proveedora de múltiples beneficios, entre ellos la vista se recrea con el paisaje y colores, el oído con sus sonidos naturales, el olfato con los olores silvestres. (pp. 181-182)

En las áreas urbanas, Sorensen et. al. (1998) mencionan que, los nichos verdes:

Mejoran el aire, el agua y los recursos del suelo al absorber contaminantes del aire, incrementar las áreas de captación y almacenamiento de agua y estabilizar los suelos y, que los bosques urbanos actúan como amortiguadores de la temperatura –al dar sombra en el verano y detener el viento en el invierno– además de reducir la contaminación por ruido y los niveles de CO2 y proporcionar hábitat para la fauna silvestre. (p. 8)

Las áreas verdes desempeñan un papel preponderante en el bienestar y la calidad de vida de la población, permitiendo que los habitantes sientan una motivación ética u obligación moral de cuidar al medio ambiente (Dearborn & Kark, 2009, p 434). Los parques, e incluso los pequeños jardines y corredores verdes, aportan beneficios sociales para las comunidades urbanas que los albergan, al fungir como puntos o centros de integración comunitaria y de reunión familiar. Las plantas se vuelven, de esta manera, elementos versátiles del ámbito urbano, con ciclos de vida propios que dan un carácter dinámico al paisaje, lo que genera vínculos importantes entre los habitantes y las áreas verdes.

Los espacios verdes que, toman la forma de "patches" (Forman & Godron, 1986), cuya fisionomía difiere del ambiente circundante (Burel & Baudry, 2002, p 235), son fragmentos de vegetación no lineales que varían en tamaño, forma, tipo, heterogeneidad y características de frontera. Esto es, superficies del paisaje compuestas de comunidades de animales y de plantas diversas que proveen funciones ecológicas para el bienestar y la calidad de vida de sus pobladores, en tanto que modifican el microclima urbano, estabilizan la temperatura e incorporan oxígeno a la atmósfera, además de que absorben polvos, lo que reduce la contaminación atmosférica (Nowak et al., 1998, pp 17-38).

En el ámbito urbano, las plazas, parques, jardines, patios, etc., fungen como nichos verdes. Si estos se encuentran conectados mediante corredores o elementos lineales, que bien pueden ser de tipo natural (ríos, crestas, pasos de animales) o artificial (carreteras, líneas de alta tensión, calles y avenidas, por citar algunos ejemplos) del paisaje, su función ecológica se incrementa. En este caso, los corredores, de acuerdo con Vila et al. (2007):

Desempeñan un papel fundamental para permitir la interconexión entre los distintos fragmentos y reducir el denominado efecto de distancia que determina la presencia de un menor número de especies en los fragmentos más aislados, además de facilitar el desplazamiento y/o migración de los organismos entre fragmentos. (p. 158)

El acomodo de la vegetación de traspacio (VT) en las ciudades obedece, más que a un proceso de fragmentación de la masa forestal, como suele suceder en la mayoría de los espacios naturales y seminaturales asociado en muchos de los casos al cambio de uso de suelo y sus respectivas implicaciones en la conservación de la naturaleza (Farina, 1998, p 59), a la definición proporcionada por González et al. (2014): "son manifestaciones de una población en contacto continuo con la naturaleza, donde las relaciones sociales traspasan las barreras arquitectónicas para convertirse en expresiones culturales que se encuentran entre lo privado y lo público" (p.61).

Como áreas reducidas de tierra, relativamente homogéneas al interior, los fragmentos de VT al interior de las viviendas forman parte de un mosaico, matriz o sistema más complejo. Como huertas, jardines o patios interiores en las viviendas. Estos parches o fragmentos, usualmente de origen cultural, aislados o conectados, desempeñan un papel protagónico en el paisaje urbano: propician un hábitat adecuado a las especies de flora y fauna comunes a los entornos urbanos (Gómez, 1997, p. 148). No menos importante son aquellos de tipo ecológico, como elementos reguladores de condiciones medio ambientales, capaces de producir oxígeno y absorber el bióxido de carbono o de aumentar la humedad a través del proceso de evapotranspiración.

En ambientes modificados por el humano, Farina (1998, p. 95) señala que, los fragmentos, a manera pequeños ecotones, son sitios con alta diversidad y funcionan como refugio para especies raras o sensibles al régimen de perturbaciones humanas. De aquí la importancia de poner en valor los fragmentos forestales en los ámbitos urbanos desde una perspectiva ambiental y paisajística, a partir del análisis de su composición, estructura y funcionamiento.

A escala urbana, a escala de sitio o parcela de estudio, el fragmento de VT, además de fungir como espacio privado para la interacción social, es, ante todo, un nicho urbano-paisajístico muy dinámico debido a la presencia de especies diversas que comparten el mismo territorio, lo que le otorga un grado de naturalidad con formas, estructuras, colores, texturas y fragancias propias. Esto se debe a la diversidad de especies arbóreas, arbustivas y herbáceas que cohabitan en su interior.

A escala arquitectónica, el nicho verde referido como el jardín o patio forestal con funciones específicas, es un espacio que ha sido parte integral de la residencia del ser humano. De acuerdo con Cleveland y Solieri (1987, en González, 2014) "El patio siempre ha sido la principal estrategia de subsistencia del hombre, esto, después de que dejó ser un ser nómada y se dedicó a las actividades agrícolas y ganaderas" (p.17). Estos patios, de acuerdo con Capitel (2005):

Eran espacios regulares y/o irregulares en cuanto a su forma, sin embargo, con ciertas funciones al interior o lateral de la casa, los cuales incluso abarcaban 20 y 40% de la superficie total de la planta. Estos por lo regular solían ser cerrados al interior de las casas, reforzando el carácter privado del espacio construido. (p. 17)

Bernal (1975) considera que el jardín moderno de la casa habitación:

Persigue no únicamente ser una cosa bella, que engalane la arquitectura, sino que además se pueda utilizar para cada uno de los miembros de la familia; el jardín en casa, y las áreas verdes urbanas, representan el único contacto del hombre de la ciudad con la naturaleza; refugios resguardados con altas paredes y alambre de púas escondido entre las enredaderas. (pp. 34-35)

Mientras que Ruiz (2011) señala que, en los patios de las casas y jardines de Luis Barragán:

Reaparece el eco de la memoria de la arquitectura tradicional mexicana: en sus colores, técnicas constructivas, en las soluciones, en la distribución, llevadas a una simplicidad tal que al filtrarlas a través de la experiencia con lo moderno. La mirada se centra totalmente en el patio. (pp. 20-24)

A escala arquitectónica, los patios frontales, centrales y traseros de las casas funcionan como espacios de convivencia vecinal donde las familias se encuentran con la naturaleza, como nichos ecológicos que regulan el clima local e incrementan la biodiversidad, al tiempo que estabilizan el suelo urbano. Al interior de los traspatios, las plantas funcionan a la vez de pisos, muros, columnas e incluso techos, con el objetivo de generar subespacios dentro de los espacios cerrados y abiertos, manteniendo controles visuales. De acuerdo con Peña (1998, p. 23) la vegetación, en dichos casos, actúa como elemento definidor del espacio, elemento de control visual y modulador de escala y forma del espacio.

Jilquilpan de Juárez, un caso de estudio

Al nivel que sea, urbano o arquitectónico, Jilquilpan es referente de una ciudad verde a escala regional. Conocida como “la ciudad de las jacarandas”, la ciudad entrelaza plazas, templos, jardines y puentes, todos ellos ornamentados con árboles y arbustos variados, otorgando al espacio público y privado un agradable ambiente pueblerino.

El valor ambiental y paisajístico que tiene la VT al interior de las viviendas en la ciudad de Jilquilpan es un tema poco abordado, más aún si no se cuenta con un inventario de la vegetación que dé cuenta de su emplazamiento, disponibilidad, estado y distribución pública y privada a escala urbana, de sector, cuadrante, fraccionamiento o colonia, incluso a nivel de manzana, vivienda o de predio (Figura 1).



Figura 1. Vista panorámica de la vegetación de traspatio (VT) en el centro de Jilquilpan.

En la actualidad, Jilquilpan cuenta con un programa de manejo con los lineamientos y/o criterios normativos para administrar los bosques: “Bosque Cuauhtémoc” y “Parque Juárez”. Sin embargo, el arbolado público y privado carece de un plan de manejo en los actuales instrumentos de planeación en materia de ordenamiento territorial y forestal a escala urbana. En los últimos tres planes municipales (2015–2018, 2018–2021 y 2021–2024) y de desarrollo urbano (Periódico Oficial del Estado [POE], 2015), las estrategias y acciones se limitan a mejorar las áreas verdes, parques, jardines y camellones, así como a promover mecanismos de reforestación en las áreas protegidas, así como definir, recuperar y dotar de áreas verdes.

Los esfuerzos del gobierno municipal por mantener en condiciones óptimas el arbolado urbano han sido insuficientes e infructuosos, debido a que no se cuenta con un inventario real de los árboles en Jilquilpan, las especies existentes, su localización y distribución dentro del ámbito urbano, como tampoco de diagnósticos del estado de salud que guardan las arboladas en los espacios públicos (como calles, avenidas, plazas, jardines, parques, etc.) y privados (viviendas). Esto se agrava si la población desconoce sobre temas que dan cuenta, por ejemplo, de las enfermedades que ponen en riesgo y peligro la integridad biológica del recurso forestal en el ámbito urbano.

Por otro lado, la incorporación de elementos naturales en los patios de las viviendas indica que, en determinados lugares, culturas y tradiciones, el uso de la naturaleza privada puede aportar igual o incluso mayor beneficio social para los propietarios de las casas en comparación con aquella disponible en los espacios públicos, abriendo nuevos caminos para abordar y entender la naturaleza urbana (González et al., 2014, p 62).

Objetivo

El presente trabajo tiene como objetivo valorar paisajística y ambientalmente los remantes de VT al interior de las viviendas en el primer cuadro del centro de la ciudad de Jiquilpan. Para ello se propuso obtener datos métricos (tamaño y forma) de los fragmentos, e información del paisaje a nivel del área de estudio, sector y manzana. La valoración ambiental y paisajística se tasó en términos de la abundancia y la representatividad de la vegetación de traspatio al interior del área de estudio. La propuesta pretende generar información geoespacial respecto a estos y otras temas relacionados con el arbolado urbano, esto es, cartografía con la localización del arbolado, áreas con déficit del recurso que permita identificar espacios potencialmente para programas de forestación y reforestación a escala de viviendas.

Metodología

Para llevar a cabo valoración paisajística y ambiental a escala del área de estudio, se precedió a generar el mapa con los remantes de VT al interior de las viviendas. La digitalización de la VT se generó en un SIG sobre una imagen TIF. (29 102 x 24 183 px) de alta resolución (5.1cm/px; con error máximo de 4.87 m), compuesta por 2 810 imágenes, las cuales fueron tomadas con una cámara (4K/30fps, 1 080p/60fps de 12 megapíxeles) montada sobre un dron (Phantom 3 Profesional) a una altura de noventa metros de la superficie.

Una vez obtenido el mapa, se procedió a generar información métrica de los fragmentos forestales que dan cuenta de la composición del paisaje, es decir, el Área (ÁREA) y el Perímetro (PERIM) de cada parche (McGarigal et al., 2023). Adicionalmente, se procedió a medir, a escala del área de estudio, de cuadrante y de manzana, la ocupación de la cubierta forestal (Total Landscape Area), que registra el dominio de esta cubierta dentro en el paisaje (PLAND). Además, se calculó el número, la densidad y el tamaño promedio (Number, Density and Mean Size) de los parches o fragmentos (Patches). Algunas de estas métricas contribuyen a entender mejor el patrón (PERIM) y composición (PLAND) del paisaje y sus aplicaciones ecológicas (ÁREA, PLAND y NP), entre otras métricas importantes (McGarigal et al., 2023).

$$AREA = a_{ij} \left(\frac{1}{10,000} \right)$$

Donde:

- ÁREA = área del parche en hectáreas.
- a_{ij} = área del parche ij (m^2).

$$PERIM = P_{ij}$$

Donde:

- PERIM y p_{ij} = perímetro (m) del parche ij .

$$PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \quad (100)$$

Donde:

- PLAND y P_i = proporción del paisaje ocupado por el tipo de parche clase forestal.
- a_{ij} = área del parche ij (m^2).
- A = área total del paisaje (m^2).

$$NP = n_i$$

Donde:

- n_i = número de parches en el paisaje del tipo de parche clase i .

$$PD = \frac{n_i}{A} (10,000) (100)$$

Donde:

- PD= Densidad de fragmentos (Patches)
- ni = número de parches en el paisaje del tipo de parche clase i.
- A = superficie total de paisaje (m²).

Debido a la escala de observación y la extensión del área de estudio, el resultado de PD referirá al cociente de la división del número de fragmentos por el área, multiplicada por 10,000, para obtener la densidad de fragmentos por hectárea.

La valoración ambiental y paisajística se tasa en términos de la abundancia y la representatividad de VT a escala del área de estudio, cuadrante y manzana, en el entendido de que, a mayor ocupación forestal, mayor será su contribución ambiental y ecológica, y, por tanto, paisajística.

Resultados

El área de estudio (74.76 ha) representa 7.29 % de la superficie total de la ciudad de Jiquilpan; se encuentra delimitada al norte por la calle Constitución, al Sur y Este por el cauce del Río Jiquilpan y al Oeste por la Av. Las Palmas. El polígono es de forma irregular y está dividido en cuatro cuadrantes: Las Palmas (24.68 ha; 33.01%), San Cayetano (19.41 ha; 25.96%), El Centro (19.46 ha; 26.03%) y El Río (11.21 ha; 14.99%), por la calle Octaviana Sánchez y la Av. Lázaro Cárdenas de oriente a poniente y de norte a sur, respectivamente (Figura 2).

¹ El área de estudio (AE) se delimitó a partir de la información proporcionada por el Programa Parcial del Centro Histórico de Jiquilpan: al norte con la C. Constitución, al sur y sureste con el Río Jiquilpan, en tanto que al oeste con la Av. Las Palmas.

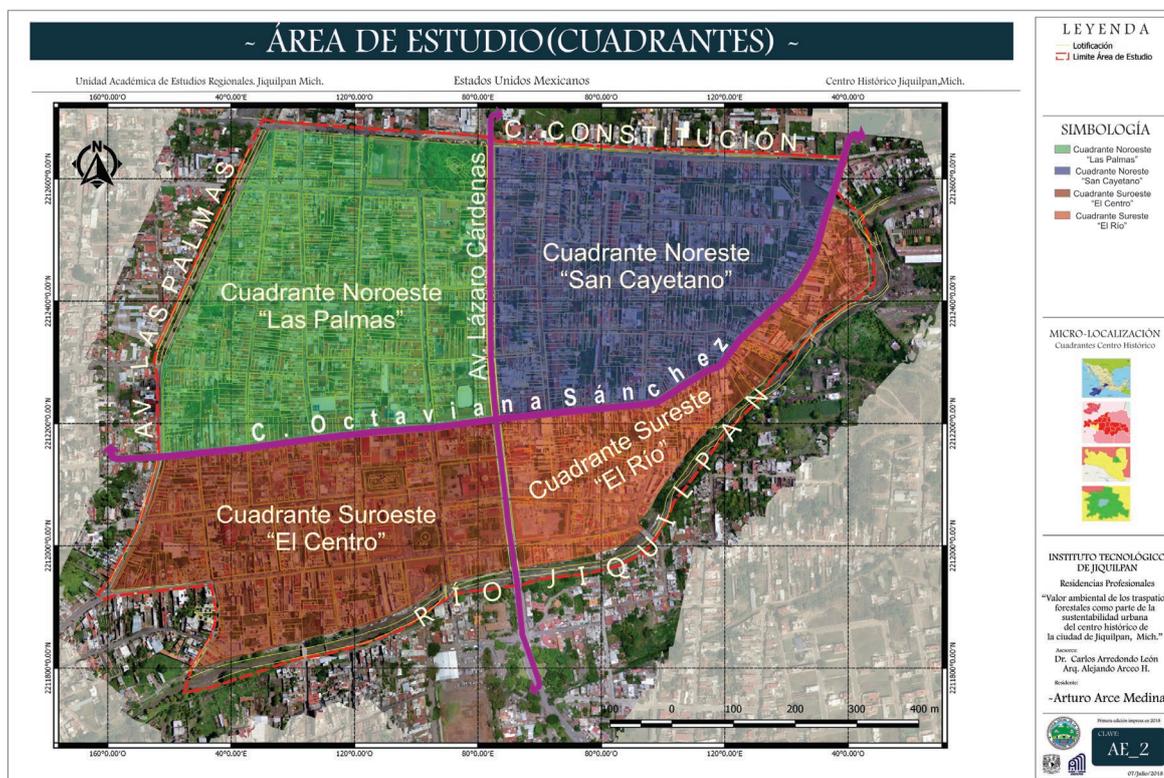


Figura 2. Área de estudio.

Ocupación y distribución de la vegetación de traspatio (VT)

Las Tablas 1 y 2, y la Figura 3 muestran la distribución y el porcentaje del paisaje de VT a escala del área de estudio y por cuadrante, respectivamente. Los resultados indican que, del total del área de estudio (74.76 ha), VT ocupa $P_i=10.15\%$ (7.55 ha) y se encuentra diseminada en 599 fragmentos ($PD=8.07$ fragmentos/ha), de los cuales, tres superan los 3 000 m² en superficie, cuatro entre los 2,000 y 2,999 m², ocho entre los 1 000 y 1 999 m², 18 entre 500 y 999 m², 101 entre los 100 y 499 m² y, 465 fragmentos entre uno y 99 m². La superficie promedio de los fragmentos fue 127 m², siendo la extensión del fragmento más grande de 3,533 m² y el menor 1.73 m².

De total de VT (7.55 ha), 36.87% (2.78 ha) se concentra en el cuadrante San Cayetano, 13.79% (1.20 ha), en El Río, 33.42% (2.52 ha), en Las Palmas y 15.92% (1.04 ha) en El Centro. La VT se distribuye en 599 fragmentos dentro del área de estudio, de los cuales, 37.39% (224) se concentra en San Cayetano, 32.55% (195) en Las Palmas, 15.52% (96) en El Centro y 14.02% (84) en El Río. De la información presentada hasta el momento, se puede apuntar que San Cayetano exhibe una densidad de fragmentos ($PD=11.54$ fragmentos/ha) superior a la densidad del resto de los sectores, como se observa en el cuadrante Las Palmas ($PD=7.90$), El Río ($PD=7.49$) y El Centro ($PD=4.93$), incluso mayor a la densidad a escala del área de estudio ($PD=8.07$).

Tabla 1. Superficie (ha) y porcentaje (%) de VT a escala de cuadrante.

Cuadrante	Sup. Total		Sup. de VT		
	ha	% a EAE*	ha	% a EAE**	% a EAE***
Las Palmas	24.68	33	2.52	10.25	33.42
San Cayetano	19.41	26	2.78	14.42	36.87
El Centro	19.46	26	1.04	5.33	15.92
El Río	11.21	15	1.20	10.79	13.79
Subtotales	74.76	100	7.55	10.15	100

* Cociente entre la superficie del cuadrante y la superficie total del área estudio, multiplicado por 100.

** Cociente entre la superficie de VT del cuadrante y la superficie total del área estudio, multiplicado por 100.

*** Cociente entre la superficie de VT y superficie total de VT a escala del área estudio, multiplicado por 100.

Tabla 2. Distribución por tamaño de fragmento a escala de cuadrante.

Cuadrante	Fragmentos	Rango en m ²					
		> 3000	2000-2999	1000-1999	500-999	100-499	1-99
Las Palmas	195	1	2	1	6	37	148
San Cayetano	224	2	2	2	7	26	185
El Río	84	0	0	3	3	18	60
El Centro	96	0	0	2	2	20	72
Subtotal	599	3	4	8	18	101	465

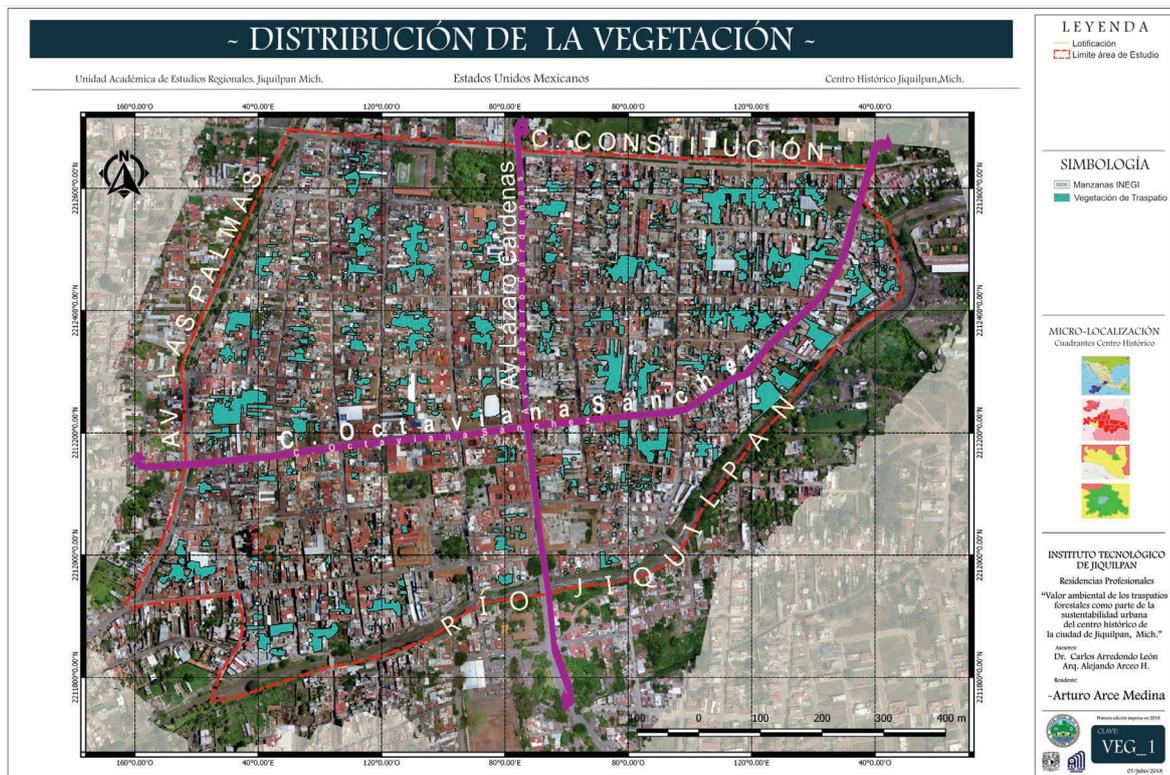
La Tabla 3 muestra el porcentaje de ocupación de VT por tamaño de fragmento a escala de cuadrante. Como se puede observar, los fragmentos entre los 100 y 400 m² de superficie tienen una representatividad paisajística dominante en los cuadrantes El Centro (40.40%) y Las Palmas (30.61%), en tanto que aquellos mayores a los 3 000 m² y los que oscilan entre los 1 000 y 1 999 m², se encuentran en los cuadrantes de San Cayetano (23.58%) y El Río (35.66%), respectivamente.

En las Tablas 2 y 3, es notorio que 44.46% del total de VT se distribuye en 566 fragmentos menores a 499 m² de superficie. Si bien, 465 son menor a 99 m² (77.62% del total de fragmentos), estos contienen tan solo 17.16% del total de la cubierta de VT. Mientras que el resto, es decir, aquellos que oscilan entre los 100 y 499 m² (101) concentran 27.30% del total de VT.

Cuadrante	Área (m ²)	Ocupación (%) por tamaño de los fragmentos					
		> 3000	2000-2999	1000-1999	500-999	100-499	1-99
Las Palmas	25,343.50	11.89	17.68	5.050	17.30	30.61	17.47
San Cayetano	28,001.90	23.58	14.96	10.06	17.75	18.70	14.92
El Río	12,164.00	0.00	0.00	35.66	17.64	29.01	17.69
El Centro	10,423.00	0.00	0.00	24.84	13.19	40.40	17.69
Subtotal	75,932.40	12.67	11.42	14.50	16.95	27.30	17.16

Tabla 3. Ocupación (%) por tamaño de fragmento a escala de cuadrante.

Figura 3. Distribución por tamaño de fragmento a escala de cuadrante.



Del total de manzanas a escala del área de estudio (60), 11 de ellas concentran en 186 fragmentos, 50.20% (37 911.20 m²) del total del área de VT (75 517 m²), siendo San Cayetano el cuadrante con la mayor densidad de fragmentos (24.89) y superficie promedio verde (3 094.09 m²) por manzana, seguido de Las Palmas (9.75; 1,261.97 m²), El Río (8.40; 1,201.93 m²) y El Centro (4.57; 495.79 m²), incluso superior a la presentada a escala del área de estudio (9.98; 1,258.62 m²) (Tabla 4 y Figura 4).

Tabla 4. Porcentaje de VT a escala de cuadrante.

Cuadrante	Fragmentos	Manzanas	Densidad	VT (m ²)	Sup. de VT por Manz. (m ²)
Las Palmas	195	20	9.75	25,239.30	1,261.97
San Cayetano	224	9	24.89	27,846.80	3,094.09
El Río	84	10	8.40	12,019.30	1,201.93
El Centro	96	21	4.57	10,411.60	15,9495.792
Subtotales	599	60	9.98	75,517.00	12,58.62



Figura 4.
Distribución espacial
de VT por manzana.

De las once manzanas mencionadas, cuatro de ellas resaltan por la representatividad de VT a escala del área de estudio, de cuadrante y de la propia manzana. La primera (60002) y la más importante, se localiza en el cuadrante de San Cayetano. Con sesenta y nueve fragmentos en su interior, esta manzana contiene 42.14% y 15.54% del total de área verde a escala de cuadrante y del área de estudio, respectivamente. La Figura 5 muestra dos fragmentos que, por su dimensión, representan 55% del área total verde de la manzana 60002 (11 734.90 m²), esto es, 30.10% (3 533.30m²) y 25.89% (3 039.20 m²), respectivamente.

Figura 5. Arriba la manzana 60002 y abajo, fragmentos de área verde a escala.



La segunda manzana (75004), con veintitrés fragmentos en su interior, contiene 5.61% y 16.78% del total de área de VT a escala del área de estudio y del cuadrante de Las Palmas, respectivamente. Del total de fragmentos de esta manzana, resalta uno que, por su dimensión (3 014.50 m²), abarca 71.16% del total de VT de esta unidad geoestadística. En tanto el área del resto de los fragmentos oscila entre de los 55 y 55 m² en promedio.

La tercera manzana (60011), con veinticuatro fragmentos, abarca 4.94 % y 31.05% del área total de VT a escala del área de estudio y del cuadrante El Río, respectivamente. A diferencia de la manzana anterior (75004), la 60011 alberga tres fragmentos que, en totalidad (2 271.90 m²), suman más del 60% del total de VT. No menos importante en el cuadrante El Río, resalta la representatividad de VT de las manzanas 60020 y 60055 que, en conjunto, aportan más del 45% del área verde de este cuadrante.

La cuarta manzana (75037) se localiza en el cuadrante El Centro. La VT es poco significativa (2.79%) en la escala del área de estudio, sin embargo, los siete fragmentos que la integran representan 20.25% de VT del cuadrante que, sumados a los seis fragmentos de la manzana 81009 y otros tantos de la manzana 81010, abarcan en su conjunto el 50% de VT a escala del cuadrante (Tabla 5).

Tabla 5. Ocupación de VT por manzana a escala de cuadrante.

Las Palmas					
Código Manzana	Área Manz. (m²)	Fragmentos	Sup. VT (m²)	% VT Manz.	% VT Área de estudio
56022	8,719.43	5	1,118.70	4.43	1.48
56023	3,668.48	1	1,92.00	0.76	0.25
56024	1,345.70	0	0.00	0.00	0.00
56032	7,085.04	0	0.00	0.00	0.00
56033	8,289.41	0	0.00	0.00	0.00
75001	14,485.91	17	2,012.90	7.98	2.67
75002	10,575.75	11	1,130.80	4.48	1.50
75003	10,075.13	15	1,210.10	4.79	1.60
75004	17,011.38	23	4,235.80	16.78	5.61
75006	8,530.16	11	924.30	3.66	1.22
75007	7,755.20	7	626.50	2.48	0.83
75017	9,433.77	10	934.60	3.70	1.24
75018	8,237.06	12	520.20	2.06	0.69
75019	12,917.30	11	2,584.70	10.24	3.42
75020	13,369.90	10	2,548.40	10.10	3.37
75021	11,610.75	11	2,529.70	10.02	3.35
75022	12,525.30	16	938.40	3.72	1.24
75028	16,568.08	16	1,585.00	6.28	2.10
75029	11,904.40	7	1,414.80	5.61	1.87
75030	40,365.05	12	732.40	2.90	0.97
20 manzanas	20,447.20	195	25,239.30	100.00	33.42

San Cayetano

Código Manzana	Área Manz. (m ²)	Fragmentos	Sup. VT (m ²)	% VT Manz.	% VT Área de estudio
60001	31,959.84	45	3,629.40	13.03	4.81
60002	51,504.58	69	11,734.90	42.14	15.54
60004	12,452.57	16	2,902.70	10.42	3.84
60005	11,070.43	16	1,171.10	4.21	1.55
60006	7,572.43	11	960.90	3.45	1.27
60007	16,525.87	23	2,278.80	8.18	3.02
60012	9,944.59	21	1,173.20	4.21	1.55
60014	18,795.68	18	3,861.30	13.87	5.11
60015	7,336.57	5	134.50	0.48	0.18
9 manzanas	167,162.56	224	27,846.80	100.00	36.8749

El río

Código Manzana	Área Manz. (m ²)	Fragmentos	Sup. VT (m ²)	% VT Manz.	% VT Área de estudio
60027	6,965.22	0	0.00	0.00	0.00
60053	2,286.94	0	0.00	0.00	0.00
60026	5,186.01	4	111.80	0.93	0.15
60021	9,989.55	6	387.80	3.23	0.51
60048	8,228.27	17	845.10	7.03	1.12
60031	6,071.02	8	605.50	5.04	0.80
60049	8,631.32	6	924.40	7.69	1.22
60011	17,191.38	24	3,732.50	31.05	4.94
60020	11,407.39	13	2,694.70	22.42	3.57
60055	8,090.09	6	2,717.50	22.61	3.60
10 manzanas	84,074.09	84	12,019.30	15.92	15.92

El centro					
Código Manzana	Área Manz. (m ²)	Fragmentos	Sup. VT (m ²)	% VT Manz.	% VT Área de estudio
75023	5,790.26	1	78.30	0.75	0.10
75025	2,666.36	0	0.00	0.00	0.00
75041	6,355.92	0	0.00	0.00	0.00
81017	3,494.89	0	0.00	0.00	0.00
75032	2,035.66	1	2.30	0.02	0.00
75024	1,494.19	1	2.30	0.02	0.00
75033	5,827.07	1	104.70	1.01	0.14
75036	10,624.86	7	266.90	2.56	0.35
75035	6,927.04	4	188.00	1.81	0.25
75034	5,977.00	8	202.40	1.94	0.27
75008	6,356.24	5	255.40	2.45	0.34
75009	9,985.46	11	477.80	4.59	0.63
75010	7,324.43	11	466.40	4.48	0.62
75011	6,925.80	5	458.70	4.41	0.61
75031	5,468.51	3	416.60	4.00	0.55
81021	4,205.52	4	361.30	3.47	0.48
81011	9,931.80	7	1,071.90	10.30	1.42
75038	8,299.53	8	925.60	8.89	1.23
81010	10,796.46	6	1,413.90	13.58	1.87
81009	10,410.02	6	1,611.00	15.47	2.13
75037	12,434.64	7	2,108.10	20.25	2.79
21 manzanas	143,331.66	96	10,411.60	100.00	13.79

Discusión

En los últimos años, el gobierno, la comunidad científica y las organizaciones no gubernamentales han puesto especial atención en este y otros temas que tienen a bien censar la vegetación en los ámbitos urbanos para conocer con mayor profundidad el estado vital (conservación) y la capacidad de resiliencia que la cobertura vegetal presenta ante posibles disturbios. Sin embargo, los espacios verdes urbanos de propiedad privada han sido escasamente abordados y, los pocos estudios que existen, se han enfocado en los componentes del valor natural de los patios y las posibles causas de degradación y su contribución al mantenimiento de la biodiversidad (flora y fauna) a escala urbana (González, 2014, p 17). Los más, se enfocan en atender las zonas verdes a escala urbana y periurbanas, destacado, por ejemplo, el papel positivo que la infraestructura verde desempeña en términos de servicios ecosistémicos (Thompson et al. 2003; Cameron et al., 2012, p 129).

Acercade Jiquilpan, los pocos estudios sobre los recursos naturales disponibles y las arboladas datan de 2005, con el decreto a los bosques Juárez y Cuauhtémoc como Área Natural Protegida (ANP) con el carácter de "Parque Urbano", por parte del Gobierno del Estado de Michoacán. Su denominación obedeció a su relevancia como espacios generadores de oxígeno, captadores de bióxido de carbono y de agua, reguladores del clima, así como zonas de refugio de flora y fauna silvestre, entre otras funciones (POE, 2005).

En 2016, el poder ejecutivo del estado de Michoacán aprobó el programa de manejo que establece los lineamientos y/o criterios normativos para administrar los bosques: "Bosque Cuauhtémoc" y "Parque Juárez", vigentes hasta dicho año. Uno de los objetivos que se plantea el programa de manejo es ofrecer información sobre la naturaleza misma del ANP, sus valores, importancia e implicaciones en el bienestar social de la población local para lograr mayor participación, así como cambios de actitud y prácticas hacia el medio ambiente (POE, 2016).

Se menciona, por otro lado, la plantación de árboles en los márgenes de cañadas y arroyos, y la habilitación de áreas para la reforestación, así como el mejoramiento y protección de la vegetación, y la regulación de la poda de árboles y plantas de ornato en parques y jardines (Periódico Oficial del Estado Michoacán, 2012), acciones carentes de toda perspectiva integral que incluya la gestión y el manejo integral y sustentable del arbolado (público y privado) como indicador expresivo del paisaje urbano y nudo de las interacciones sociales.

Las aportaciones del estudio de los patios son por demás relevantes para la gestión y el manejo sustentable de la vegetación en los ámbitos urbanos, existiendo un especial interés por parte de la ecología urbana sobre los ecosistemas asociados a las ciudades (González, 2014, p. 21). Los antecedentes, aunque escasos en México, son suficientes para poner en la agenda ambiental los análisis y diagnósticos encaminados a la valoración de la VT. Con la información hasta ahora generada sobre las métricas para entender mejor el patrón y composición del paisaje y sus aplicaciones ecológicas a escala del área de estudio, de cuadrante y de manzana, así como de otra información que se pudiera generar a partir de los resultados obtenidos en este trabajo (índices de forma, conectividad y aislamiento, por señalar algunos), sientan las bases para poner en relieve la importancia de estos nichos ecológicos para la conservación de la naturaleza y el patrimonio heredado de las generaciones pasadas.

Conclusiones

Los resultados indican que, si bien el detonador de la revolución verde en Jiquilpan obedeció en un inicio a la intervención del Gral. Cárdenas por embellecer el lugar, la costumbre y tradición de plantar árboles frutales y plantas de ornato a escala de arquitectónica es una acción forestal de la población que responde más al arraigo y sentimiento de pertenencia al espacio de convivencia construido.

Los resultados indican que la cobertura de VT es significativa en el centro de Jiquilpan y que, aunque no se le vea o considere como parte integral del ordenamiento forestal urbano (debido entre otros aspectos, a su localización en propiedad privada), es un factor determinante del microclima y de la funcionalidad del sistema ambiental urbano. En términos cuantitativos y comparativos, por ejemplo, la superficie de VT a escala del área de estudio equivale a la séptima parte de la superficie del patrimonio forestal del ANP de los sitios conocidos como "Bosque Cuauhtémoc" y "Parque Juárez" del municipio de Jiquilpan.

Desde la perspectiva social, es imprescindible evidenciar las formas de emplazamiento y la utilidad asociada a la vegetación de traspatio en los espacios de convivencia, patios y traspacios –corrales– de las casas de los jiquilpenses. Esto será posible si los resultados de este trabajo se complementan con encuestas y entrevistas a los propietarios de las viviendas, además de registros fotográficos en campo de los fragmentos forestales, de tal manera que se evidencie la utilidad y el uso asociado y, cómo esta información, se relaciona con otros aspectos (p.ej. socioeconómicos), que dan cuenta de las costumbres y tradiciones de la población en su actuar forestal. Pero, sobre todo, desde la perspectiva ecológica, es importante demostrar con visitas de campo la diversidad florística y faunística que habita al interior de estos nichos ecológicos, asociando la información recabada con datos métricos de los fragmentos (p. ej. forma de los fragmentos), así como otros que dan evidencia de su funcionalidad dentro del sistema (p, ej. conectividad).

Agradecimiento

El trabajo presenta los resultados parciales de un proyecto más ambicioso que incluye la totalidad de los traspacios forestales de la ciudad de Jiquilpan, Michoacán. Se extiende un reconocimiento al Arq. Arturo Arce Medina y al Mtro. Alejandro Arceo Hernández, otrora residente profesional y profesor del Instituto Tecnológico de Jiquilpan, respectivamente, quienes participaron activamente para la realización de este trabajo en las instalaciones de la UAER-UNAM; así también, a la Mtra. Xóchitl Hernández Aguilera, técnica académica adscrita al Área de Cómputo y al técnico C. Moisés Vargas Aguilar.

Referencias

- Bernal, S.C. (1975). Introducción a la Arquitectura paisajística. Arquitectura de paisaje. Curso de actualización. División de Estudios Superiores de la Escuela Nacional de Arquitectura, UNAM.
- Burel, F. & Baudry, J. (2002). *Ecología del paisaje. Conceptos, métodos y aplicaciones*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Cameron, R., Blanusa, T., Taylor, J., Salisbury, A., Halstead, A., Henricot, B. & Thompson, K. (2012). The domestic garden: its contribution to urban green infrastructure. *Urban Forestry and Urban Greening*, 11(2), 129-137. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2012.01.002>
- Capitel, A. (2005). *La arquitectura del patio*. Ed. Gustavo Gili.
- Cárdenas, L. (2003). *La Alameda de Jiquilpan*. Gobierno del Estado de Michoacán.
- Cleveland, D.A. y Soleri, D. (1987). Household gardens as a development strategy. *Human Organization* 46(3), 259-269.
- Dearborn, D. & Kark, S. (2009). Motivations for conserving urban biodiversity. *Conservation Biology*, 24(2), 432-440. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01328.x>
- Farina, A. (1998). *Principles and methods in landscape ecology*. Chapman & Hall.
- Forman, R.T.T. & Godron, M. (1986). *Landscape ecology*. Wiley.
- Gómez, L.F. (1997). *Zonas verdes y espacios libres*. Consejería de Medio Ambiente, 139-151. http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/consolidado/publicacionesdigitales/20-51_EL_MEDIO_AMBIENTE_URBANO_EN_ANDALUCIA/20-51/9_ZONAS_VERDES_Y_ESPACIOS_LIBRES.PDF
- González, G.A. (2014). *Estudio ecológico de los patios urbanos en León (Nicaragua). Su contribución a la biodiversidad, el paisaje y el patrimonio* (Tesis doctoral). Universidad de Alcalá. <http://hdl.handle.net/10017/20641>
- González, C.P., Breuste, J. & Morcillo, L.R. (2014). Naturaleza privada y calidad de vida. Influencia de la naturaleza doméstica en el bienestar de los propietarios de las casas con patio de la ciudad de Córdoba, España. *Revista de Geografía Norte Grande*, (57), 53-66. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022014000100005>
- McGarigal K., Cushman, S.A., & Ene, E. (2023). *FRAGSTATS v4: Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps*. <https://www.fragstats.org>
- Naranjo, P.M.L. (2009). Una revisión teórica sobre el estrés y algunos aspectos relevantes de éste. *Educación*, 33(2), 171-190.
- Nowak, D.J., Dwyer J.F., & Childs, G. (1998). Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano. En L. Krishnamurthy & J. Nascimento (Eds.), *Áreas verdes urbanas en Latinoamérica y el Caribe* (pp. 17-38). Centro de Agroforestería para el Desarrollo Sustentable, Universidad Autónoma de Chapingo.
- Peña, C.Á. (1998). *Las Plantas en el Diseño del Paisaje: Funciones arquitectónicas y estéticas*. Universidad Autónoma de Baja California.
- Periódico Oficial del Estado*. (2005). Decreto que declara área natural protegida a los sitios conocidos como "Bosque Cuauhtémoc" y "Parque Juárez" del municipio de Jiquilpan (tomo

CXXXV, núm. 37). Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo.

Periódico Oficial del Estado. (2015). Programa Municipal de Desarrollo Urbano de Jiquilpan 2013-2030 (tomo CLXII, núm. 64). Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo.

Periódico Oficial del Estado. (2016). Resumen del programa de manejo área natural protegida de los sitios conocidos como "Bosque Cuauhtémoc" y "Parque Juárez" del municipio de Jiquilpan (tomo CLXV, núm. 55). Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo.

Periódico Oficial del Estado Michoacán (2012). Reglamento de Imagen Urbana y de Paisaje de Jiquilpan (tomo CLV, núm. 54). Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo.

Ruiz, B.P. (2011). *Arquitectura de las haciendas coloniales de México* (Tesis de maestría). Universidad Politécnica de Cataluña.

Sorensen, M., Barzetti, V., Keipi, K., & Williams, J. (1998). *Manejo de las áreas verdes urbanas*. División de Medio Ambiente del Departamento de Desarrollo Sostenible del Banco Interamericano de Desarrollo.

Thompson K., Austin K.C., Smith R.M., Warren P.H., Angold P.G. & Gaston K.J. (2003). Urban domestic gardens (I): putting small-scale plant diversity in context. *Journal of Vegetation Science*, 14(1), 71-78. <https://doi.org/10.1111/j.1654-1103.2003.tb02129.x>

Vila, J., Diego, V.L., Albert, L.P., & Anna, R.P. (2007). Conceptos y métodos fundamentales en ecología del paisaje (landscape ecology). Una interpretación desde la geografía. *Documents d'anàlisi geogràfica*, (48), 151-166.

Aplicaciones geomáticas en el estudio de la sustentabilidad
se terminó de editar en el Instituto de Ingeniería Civil de
la Universidad Autónoma de Nuevo León
en el mes de junio de 2024

Publicación electrónica
con distribución por internet

Universidad Autónoma de Nuevo León



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

ISBN: 978-607-27-2346-7