

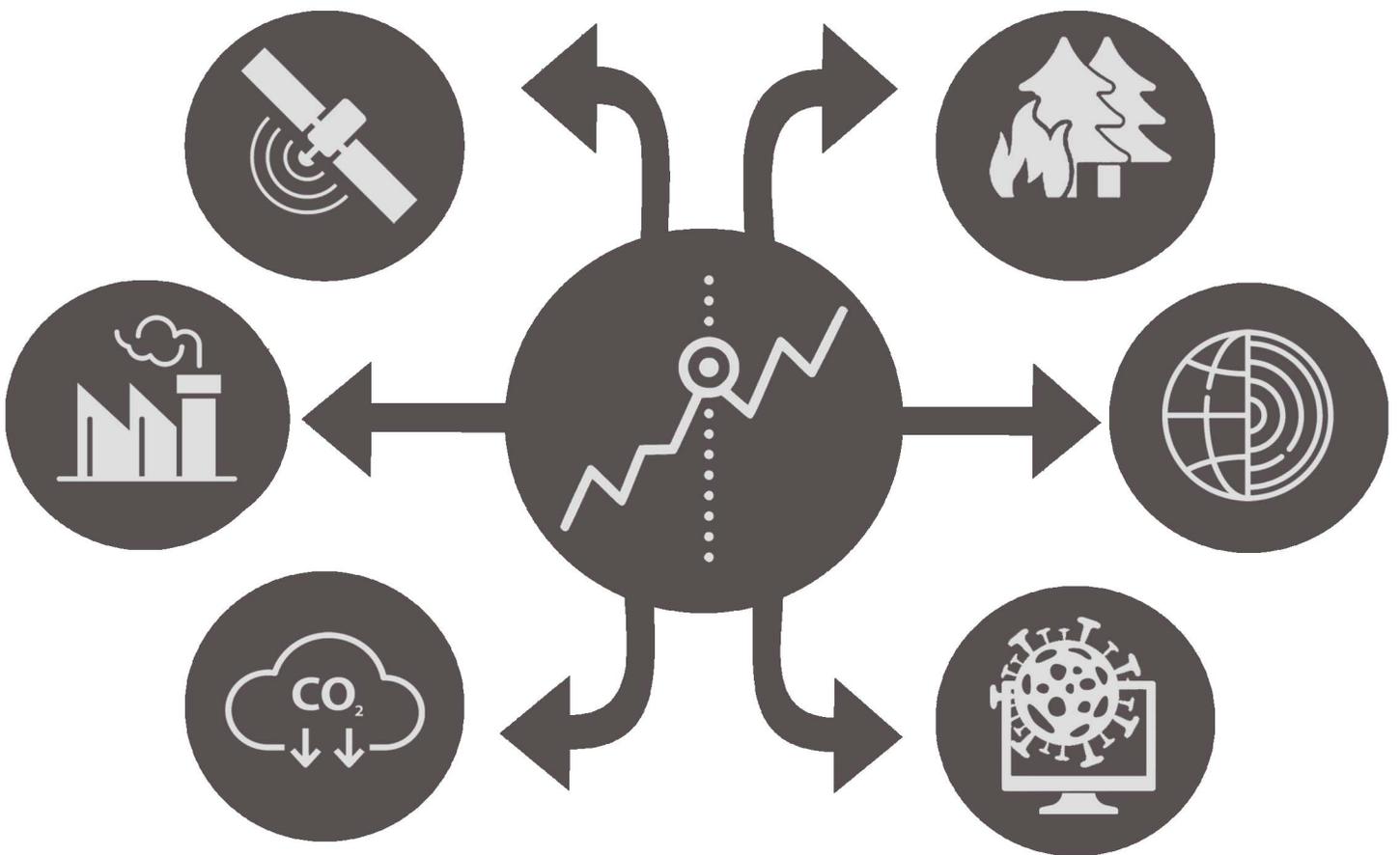
GEOTECNOLOGÍAS EN EL ANÁLISIS DE RIESGOS



Judith Ley García
Fabiola Doracely Yépez Rincón
(coordinadoras)



GEOTECNOLOGÍAS EN EL ANÁLISIS DE RIESGOS



Judith Ley García
Fabiola Doracely Yépez Rincón
(coordinadoras)





Universidad Autónoma de Baja California

Dr. Daniel Octavio Valdez Delgadillo

Rector

Dr. Luis Enrique Palafox Maestre

Secretario general

Dra. Gisela Montero Alpírez

Vicerrectora campus Mexicali

Mtra. Edith Montiel Ayala

Vicerrectora campus Tijuana

Dra. Mónica Lacavex Berumen

Vicerrectora campus Ensenada

Dra. Fabiola Maribel Denegri de Dios

Directora del Instituto de Investigaciones Sociales



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

GEOTECNOLOGÍAS EN EL ANÁLISIS DE RIESGOS

Judith Ley García
Fabiola Doracely Yépez Rincón
(coordinadoras)

Universidad Autónoma de Baja California
Universidad Autónoma de Nuevo León

Geotecnologías en el análisis de riesgos [recurso electrónico] / Judith Ley García, Fabiola Doracely Yépez Rincón, coordinadoras. -- Mexicali, Baja California : Universidad Autónoma de Baja California : Universidad Autónoma de Nuevo León, 2022.

1 recurso en línea

ISBN: 978-607-607-782-5

ISBN: 978-607-27-1870-8

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

TD171.9 G46 2022

Geotecnologías en el análisis de riesgos

© **D.R. 2022 Universidad Autónoma de Baja California**

Av. Avenida Álvaro Obregón y Julián Carrillo s/n, Colonia Nueva,
Mexicali, Baja California, México C.P 21100.

© **D.R. 2022 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. 2022 Judith Ley García y Fabiola Doracely Yépez Rincón**

Las características de esta publicación son propiedad de la
Universidad Autónoma de Baja California

Formación: Mónica Judith Ochoa García
Diseño de portada: Pamela Lozano Rivera



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

ISBN de las entidades coeditoras

UABC: 978-607-607-782-5

UANL: 978-607-27-1870-8

ÍNDICE

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Introducción | 9 |
| Índice de amenaza a la biodiversidad por incendios forestales | 15 |
| <i>María Isabel Cruz López</i> | |
| Probabilidad de ocurrencia de incendios forestales bajo condiciones del ENOS en Guanajuato | 27 |
| <i>Michelle Farfán Gutiérrez, Christian Domínguez Sarmiento, Alejandra Espinoza Maya, Alejandro Jaramillo Moreno, Camilo Alcántara Concepción, Israel Tovar Orenday, Alejandro Flamenco Sandoval</i> | |
| Análisis espacio temporal de emisiones de carbono negro en regiones cañeras de México..... | 39 |
| <i>Ángel de Jesús Quiroz Gaspar, María Guadalupe Galindo Mendoza, Pedro Pérez Medina</i> | |
| El uso de líquenes como bioindicadores para la validación de imágenes de satélite de contaminantes atmosféricos en Sierra de Álvarez, San Luis Potosí | 55 |
| <i>Stacey Juruan De La Cruz Martínez, María Guadalupe Galindo Mendoza</i> | |
| Monitoreo de la contaminación atmosférica de la ciudad de San Luis Potosí mediante imágenes de satélite | 67 |
| <i>Geovanni Saldierna Salas, María Guadalupe Galindo Mendoza</i> | |
| Industria manufacturera y emisiones indirectas de CO ₂ a nivel municipal | 79 |
| <i>Fabiola Maribel Denegri de Dios, Judith Ley García, Carlos David Solorio Pérez</i> | |
| Vulnerabilidad y pobreza digital ante la enseñanza remota de emergencia durante la pandemia de COVID-19 en Baja California | 91 |
| <i>Tracy Díaz Hernández, Judith Ley García</i> | |
| Carta de riesgo geológico por agrupación de zonas homogéneas de roca-suelo y zonas morfológicas del Cerro de la Silla, Nuevo León | 103 |
| <i>Luis Eduardo Arista Cázares, José Rosbel Chapa Guerrero, Gabriel Chávez Cabello, Nelly Lucero Ramírez Serrato</i> | |

| | |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Zonificación y evaluación del peligro geomorfológico en Zumpango del Río, Guerrero | 115 |
| <i>Elizabeth Núñez Carachure, Oscar Frausto Martínez, Alma Villaseñor Franco</i> | |
| Obtención de parámetros geomorfométricos comparando GLS, UAV y mediciones de campo para el monitoreo de deslizamientos urbanos | 133 |
| <i>Fabiola Doracely Yépez Rincón, Nelly Lucero Ramírez Serrato</i> | |
| Conclusión general | 143 |

INTRODUCCIÓN

El libro Geotecnologías en el análisis de riesgos surge como una propuesta de trabajo de la Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (Selper) capítulo México, en el marco de la XXIV Reunión Nacional: Geomática para el desarrollo sostenible. Esta sociedad tiene como uno de sus principales objetivos promover actividades relacionadas con la percepción remota y las ciencias espaciales de modo que contribuyan con la comunidad (Selper, 2022). En esta ocasión, Selper convocó a la comunidad académica a reflexionar acerca de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y, para esta obra en particular, a compartir la investigación que realiza en materia de riesgo de desastre.

Desde la década de los años noventa, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) ha llevado a cabo diversos acuerdos, conferencias y cumbres a nivel mundial dirigidas a lograr un desarrollo sostenible. Inicialmente, en la Cumbre de la Tierra, Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo o Conferencia de Río de Janeiro (ONU, 1992a), se planteó la necesidad de adoptar un modelo alternativo de desarrollo que no estuviera basado simplemente en un crecimiento económico voraz, sino en la interrelación entre aspectos económicos, ambientales y sociales.

Además de la creación de la Comisión sobre Desarrollo Sostenible, la Cumbre de la Tierra tuvo como resultados la Declaración de Río (ONU, 1992b), el Programa 21 o Agenda 21 (ONU, 1992c) y la apertura de dos instrumentos vinculantes: la Convención Marco de

las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (ONU, 1992d) y el Convenio sobre la Diversidad Biológica (ONU, 1992e); así como un documento informal que establece los principios relativos a los bosques (ONU, 1992f).

La Agenda 21 es un plan de acción que debía ser adoptado mundialmente para promover la transición hacia el desarrollo sostenible, en la sección II considera acciones para la conservación y gestión de recursos, como son: la protección de la atmósfera y los recursos naturales; la lucha contra la deforestación, desertificación y sequía; la conservación de la diversidad biológica y la ordenación de los ecosistemas frágiles; entre otras (ONU, 1992c).

En 1997, tal como se acordó previamente, durante el 19 período extraordinario de sesiones de la Asamblea General (1997), se llevó a cabo un examen quinquenal de los logros obtenidos en la ejecución del Programa 21 y se planteó un plan para su ulterior ejecución, lo que culminó en el acogimiento de una serie de objetivos clave.

De esta manera, en la Cumbre de 2000 se adoptó la Declaración del Milenio (Asamblea General, 2000) donde, entre otros temas, se abordó la protección del entorno común, señalando que no se deben “escatimar esfuerzos por liberar a toda la humanidad, y ante todo a nuestros hijos y nietos, de la amenaza de vivir en un planeta irremediamente dañado por las actividades del hombre, y cuyos recursos ya no alcancen para satisfacer sus necesidades” (p.4), optando por una nueva ética con respecto al medio ambiente.

Así, entre los ocho Objetivos del Desarrollo del Milenio (ODM) propuestos para ser alcanzados en 2015, se estableció la necesidad de garantizar la sostenibilidad del medio ambiente a partir de la reducción de: la contaminación, las pérdidas de recursos, la diversidad biológica y los efectos de los desastres.

En el año 2015, al concluir la vigencia de los ODM, la ONU celebró en Nueva York la Cumbre sobre el Desarrollo Sostenible “Cambiando nuestro mundo”, donde se adoptó el plan denominado Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. La Agenda 2030 plantea 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 metas que buscan poner fin a la pobreza, proteger al planeta, además de velar por la prosperidad y la paz mundial (Asamblea General, 2015a). En ella, la protección del medio ambiente es un tema transversal, pero, de manera particular se establece la necesidad de garantizar una vida sana y promover el bienestar de la población (objetivo 3), adoptar medidas para combatir el cambio climático (objetivo 13), proteger la vida submarina

(objetivo 14) y los ecosistemas terrestres (objetivo 15).

En este sentido, un tema fundamental es la reducción de riesgo de desastres, dado que estos destruyen los adelantos logrados por los países en las tres dimensiones de la sustentabilidad (económica, social y ambiental) y amenazan su desarrollo futuro. Por la importancia que tiene el tema, la ONU estableció una línea especial de trabajo, de tal forma que, la Agenda 2030 va de la mano con otros acuerdos, como el Marco de Sendai para la Reducción de Riesgo de Desastres 2015-2030 (Asamblea General, 2015b) y el Acuerdo de París (ONU, 2015) sobre el cambio climático.

El Marco Sendai sustituyó al de Hyogo una vez que fue aprobado en la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre la Reducción de Riesgo de Desastres. El documento considera que “una gestión eficaz del riesgo de desastres es una inversión rentable en la prevención de pérdidas futuras” y contribuye al desarrollo sostenible (Asamblea General, 2015b, p.3).

Además, el Marco de Sendai (Asamblea General, 2015b) reconoce que, si bien, los países han mejorado sus capacidades de gestión, durante la vigencia del marco previo los desastres cobraron un alto precio “menoscabando los esfuerzos para lograr el desarrollo sostenible” (p.5), dado que “el grado de exposición de personas y bienes ha aumentado con más rapidez de lo que ha disminuido la vulnerabilidad” (p.3-4). En este sentido, hace un llamado urgente a trabajar con un enfoque preventivo, a planificar medidas para reducir la exposición y la vulnerabilidad de personas y bienes, a evitar la producción de nuevos riesgos y a considerar el cambio climático como uno de los factores que aumentan el riesgo de desastres.

Para tomar mejores decisiones en la prevención, mitigación, preparación, respuesta y rehabilitación en caso de desastres, el Marco de Sendai identifica como la primera prioridad comprender el riesgo de desastres. Para ello, es importante “Reforzar la capacidad técnica y científica para aprovechar y consolidar los conocimientos existentes, y para elaborar y aplicar metodologías y modelos para evaluar los riesgos de desastres, las vulnerabilidades y el grado de exposición a todas las amenazas” (Asamblea General, 2015b, p.15).

Desde tal punto de vista, la presente obra es un esfuerzo colectivo y multidisciplinario que pretende contribuir al conocimiento en materia de riesgo de desastre, a partir de explorar, diseñar y aplicar diversos métodos, técnicas y tecnologías geoespaciales en el

estudio de amenazas y vulnerabilidades naturales y sociales.

Contenido del libro

El libro se integra por diez capítulos que se aproximan al conocimiento del riesgo en el territorio mexicano desde diversas temáticas y escalas espaciales. En materia de incendios forestales, en el primer capítulo, María Isabel Cruz construye un índice de amenaza a la biodiversidad y lo aplica a nivel nacional para identificar las áreas con mayor potencial de pérdida de biodiversidad por la acción del fuego. Mientras que, en el segundo capítulo, Michelle Farfán, Christian Domínguez, Alejandra Espinoza, Alejandro Jaramillo, Camilo Alcantara, Israel Tovar y Alejandro Flamenco, desarrollan un modelo de probabilidad climática para la ocurrencia de incendios forestales, cuya aplicación en el análisis del estado de Guanajuato les permitió demostrar la influencia de las fases del fenómeno El Niño-Oscilación del Sur en el incremento del riesgo químico.

En cuanto al monitoreo de contaminantes atmosféricos, en el tercer capítulo, Angel Quiroz, Pedro Pérez y María Guadalupe Galindo llevan a cabo el análisis espacio temporal de las emisiones de carbono negro en las regiones cañeras de México. Por su parte, en el cuarto capítulo, Stacey De la Cruz y María Guadalupe Galindo desarrollan una propuesta metodológica para validar datos espaciales de calidad del aire mediante el uso de bioindicadores y la aplican en el análisis de la Sierra de Álvarez, San Luis Potosí. Mientras que, en el quinto capítulo, Geovanni Saldierna y María Guadalupe Galindo, relacionan información proveniente de imágenes de satélite y estaciones de monitoreo de la calidad del aire para identificar áreas con altos niveles de concentración de contaminantes atmosféricos en la ciudad de San Luis Potosí.

En cuanto al cambio climático y la pandemia de COVID-19, en el capítulo sexto, Fabiola Denegri, Judith Ley y Carlos David Solorio exploran la relación entre crecimiento económico y emisiones de gases de efecto invernadero, mediante el uso de indicadores que miden la contribución municipal del sector manufacturero a las emisiones de CO₂, por consumo de electricidad. Mientras que, en el capítulo séptimo, Tracy Díaz y Judith Ley proponen el índice de pobreza digital para medir las carencias presentes en las viviendas de los estudiantes de Baja California como un indicador de vulnerabilidad social ante la educación remota de emergencia durante la pandemia.

Por su parte, los últimos textos incluidos en el libro se centran en identificar y zonificar las amenazas geológicas. En el capítulo octavo, Luis Eduardo Arista, José Chapa,

Gabriel Chávez y Nelly Ramírez elaboran una carta de riesgo geológico del cerro de la Silla en Nuevo León mediante la agrupación de zonas homogéneas de roca y/o suelo e información de zonas morfológicas. Además, en el noveno capítulo, Elizabeth Núñez, Oscar Frausto y Alma Villaseñor realizan análisis morfológicos y morfométricos para identificar las zonas de mayor peligro geomorfológico en Zumpango del Río, Guerrero. Finalmente, en el décimo capítulo, Fabiola Yépez y Nelly Ramírez obtuvieron parámetros geomorfométricos para el monitoreo de deslizamientos urbanos mediante la comparación de datos provenientes de tecnología geoespacial y mediciones de campo.

REFERENCIAS

- Asamblea General (1997). *Medio ambiente y desarrollo sostenible: período extraordinario de sesiones para realizar un examen y una evaluación generales de la ejecución del programa 21*. (A/C.2/52/L.29). República Unida de Tanzania: Organización de las Naciones Unidas.
- Asamblea General (2000). *Declaración del Milenio (A/RES/55/5)*. Nueva York, Estados Unidos: Organización de las Naciones Unidas.
- Asamblea General (2015a). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible (A/RES/40/1)*. Nueva York, Estados Unidos: Organización de las Naciones Unidas.
- Asamblea General (2015b). *Marco Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 (A/RES/69/283)*. Sendai, Japón: Organización de las Naciones Unidas.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992a). *Informe de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo (vols.1 y 2)*. Río de Janeiro, Brasil: ONU.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992b). *Declaración de Río sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo*. Río de Janeiro, Brasil: ONU.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992c). *Agenda 21*. Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Río de Janeiro, Brasil: ONU.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992d). *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Nueva York, Estados Unidos: ONU.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992e). *Convenio sobre la Diversidad Biológica*. Río de Janeiro, Brasil: ONU.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992f). *Declaración autorizada, sin fuerza jurídica obligatoria, de principios para un consenso mundial respecto de la ordenación, la conservación y el desarrollo sostenible de los bosques de todo tipo*. Río de Janeiro, Brasil: ONU.

Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Acuerdo de París*. Paris, Francia: Organización de las Naciones Unidas.

Sociedad Latinoamericana de Percepción Remota y Sistemas de Información Espacial (Selper). (2022). *¿Quiénes son SELPER?* <http://www.selper.org.mx/conocenos/>

ÍNDICE DE AMENAZA A LA BIODIVERSIDAD POR INCENDIOS FORESTALES

María Isabel Cruz López*

INTRODUCCIÓN

En la historia de la Tierra la biodiversidad y el fuego han coexistido, siendo este último parte de la evolución de las especies y, en muchas ocasiones, determinante de las características estructurales de la vegetación (He, Lamont y Pausas, 2019; Flores-Garnica, 2009). Por tal razón se le considera un factor ecológico que, al ser eliminado, puede originar alteraciones en los ecosistemas (Jardel-Peláez, Pérez-Salicrup, Alvarado y Morfín-Ríos, 2014).

El régimen de fuego tiene diferentes comportamientos y consecuencias en los ecosistemas terrestres, ello en función de las características bióticas y abióticas que estos tienen (Myers, 2006; Rodríguez-Trejo, Castro-Solís, Zepeda-Bautista y Carr, 2007; Jardel-Peláez y cols., 2014; Flores-Garnica, 2009). El régimen natural del fuego se ha modificado históricamente por las actividades antropogénicas, cuando el hombre aprendió a controlar el fuego para sus fines (Blankenship y cols., 2007; Chuvieco, 2009), desde los alimentarios hasta la explotación de los recursos naturales.

Los impactos del fuego en la naturaleza son numerosos, quizá el más visible es la

* Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.

eliminación de la vegetación (Pérez-Cabello, Echeverría, Ibarra y de la Riva, 2009), porque afecta directa e indirectamente a los ecosistemas, al dañar las especies, ya sea mediante la quema de los individuos o por la eliminación de su hábitat, reduciendo las áreas de anidación y de alimentación. Sin embargo, existen especies de vegetación que después del fuego tienen un rebrote, lo que permite su supervivencia y propagación. En este sentido, He y cols. (2019) mostraron que la diversidad de especies en algunos ecosistemas presenta una correlación positiva con el incremento de la severidad del incendio, dentro de ciertos límites, pero decrece con la severidad alta.

Los actuales sistemas de peligro de incendios forestales se basan en los elementos de la gran triada: condiciones meteorológicas, combustible y topografía, porque son los elementos que favorecen la propagación del fuego y determinan su comportamiento. Sin embargo, para llegar a la evaluación del riesgo es necesario definir la vulnerabilidad de la población expuesta que, en el caso de los incendios forestales, se refiere a los ecosistemas naturales. La integración de la vulnerabilidad en los análisis de riesgo de incendios forestales no es nueva, existen trabajos que incluyen la valoración de los factores ecológicos, como en Chuvieco y cols. (2014) y Thompson, Calkin, Finney, Ager y Gilbertson-Day, (2011).

A partir de considerar los dos roles del fuego en los ecosistemas y dado que aún falta conocimiento sobre la ecología del fuego en la biodiversidad de México, este trabajo propone una valoración de amenaza a la biodiversidad por la ocurrencia del fuego, tomando en cuenta la pérdida de las especies cuando ya se encuentran en riesgo, “porque sus poblaciones han ido disminuyendo debido a actividades humanas como la transformación de su hábitat, sobreexplotación, interacciones con especies invasoras, efectos de la contaminación, al punto que se considera necesario protegerlas” (Conabio, 2020, s.p.).

Las especies categorizadas en riesgo se encuentran en el límite entre perderlas o conservarlas, por lo que, ante un evento extremo que rompa el frágil equilibrio de su hábitat, puede ser uno de los posibles detonantes de la extinción, tanto de la especie como de sus funciones. De acuerdo con Pimm, Alves, Chivian y Bernstein (2015) las especies más predispuestas a la extinción están localizadas o son raras y la extinción se debe a la sobreexplotación. Sin embargo, en las últimas décadas las especies están amenazadas por degradación y destrucción del hábitat, contaminación y cambio global.

MÉTODO

México, localizado en Norte América, es considerado como uno de los 17 países megadiversos que albergan entre el 60 y 70% de la biodiversidad conocida en el planeta (Conabio, 2016). En este territorio habitan 126 millones de personas (Inegi, 2021) y anualmente se registran en promedio 7,000 incendios forestales (Conafor, 2020).

Variables e insumos

Bajo la premisa de que el fuego influye en la pérdida de las especies en forma directa por la quema de individuos o indirecta por la eliminación del hábitat, cuando las especies se encuentran en riesgo, se construyó el índice de amenaza a la biodiversidad por incendios forestales a partir de cinco variables, dos relacionadas a la biodiversidad y respuesta de los ecosistemas al fuego y las otras tres asociadas a la acción del fuego.

La variable biodiversidad (B) tiene como base el mapa de riqueza de especies en riesgo de extinción en México, elaborado por Rodríguez, Jiménez-Cruz, Moreno-Almeraya y Munguía-Carrara (2021), a partir de mapas de la distribución potencial de 983 especies de las 1,401 registradas en las categorías de peligro de extinción, amenazadas o probablemente extintas en el medio silvestre, de la Norma Oficial Mexicana 059-SEMARNAT-2010 (Semarnat, 2010). El mapa muestra la suma total de especies en riesgo de los grupos biológicos vertebrados, plantas y peces. Los datos se dividieron entre el valor máximo para normalizarlos de cero a uno, donde uno representa la máxima concentración de especies en riesgo.

La variable Respuesta de los ecosistemas al fuego (Rf) corresponde a la reclasificación del mapa de uso del suelo y vegetación serie VI (con escala cartográfica de 1:50,000), elaborado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi), a tres categorías asociadas a la respuesta de los ecosistemas al fuego, con base en los trabajos de Myers (2006) y Rodríguez-Trejo (2014). A cada categoría se le asignó una ponderación con base en la propuesta de Flores y cols. (2016) de la siguiente manera: ecosistemas adaptados al fuego (2), sensibles al fuego (5) e independientes del fuego (1). Las áreas de agricultura y pasto cultivados recibieron la ponderación de uno (1); mientras que los asentamientos humanos, cuerpos de agua y otros tuvieron cero (0).

La tercera variable corresponde a la Presión del fuego (Pf), que se estableció con base en el análisis temporal y espacial de los puntos de calor (fuegos activos), detectados con imágenes de satélite tipo AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) de

2000 a 2003 y MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), de 2004 a 2018. Los puntos de calor se obtuvieron del Sistema de alerta temprana de incendios forestales desarrollado y operado por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). Se contabilizó el número puntos de calor en celdas de 1000 x 1000 m. Se calculó la frecuencia anual a partir de la suma de puntos de calor entre el número de años observados, así como el intervalo de retorno, como el tiempo transcurrido entre los puntos de calor registrados dentro de la misma celda. Ambos elementos se graficaron, donde el eje X corresponde al intervalo de retorno y el eje Y a la frecuencia.

Con base en la división binaria simple empleando la mediana (Chuvieco, Giglio y Justice, 2008) se definieron cuatro categorías y se les asignó un valor de ponderación del uno al cinco, donde cinco indica mayor presión del fuego, dado que los puntos de calor tienen alta frecuencia y retorno corto. El resto de los valores fueron asignados, conforme a las categorías de la frecuencia, de la siguiente forma: el valor cuatro se asignó a la alta frecuencia y retorno largo; el tres a la baja frecuencia y retorno corto; el dos para la baja frecuencia y retorno largo; y el valor uno al resto del territorio.

La cuarta variable se refiere al área quemada (Aq). Se consideraron las áreas quemadas del año inmediato anterior, porque la ocurrencia del fuego en el mismo sitio afecta a la regeneración y daña nuevamente al ecosistema, principalmente si el comportamiento del fuego afecta a las plántulas, debido a la intensidad alta del calor o cuando el fuego se propaga a baja velocidad (Flores-Garnica y Benavides-Solorio, 2009). Los datos utilizados corresponden al producto MCD64 colección 6, generado con imágenes MODIS, por la Universidad de Maryland. Para el índice se generó el compuesto anual del año inmediato anterior y se clasificó en quemado con valor uno (1) y no quemado con valor cero (0)

La última variable corresponde a la proximidad a las actividades humanas (Pah). Se estableció una franja de 1000 m alrededor de las áreas de uso agrícola, pastos cultivados y asentamientos humanos, con base en el mapa de uso del suelo y vegetación serie VI de Inegi.

Construcción del índice

La construcción del índice tiene dos pasos. El primero fue la ponderación de las variables, para ello se utilizó el método Proceso de análisis jerárquico, descrito como una teoría de

medición a través de comparaciones de pares, basado en los juicios de expertos para derivar escalas de prioridad (Saaty, 2008). Se generó una matriz de comparación de variables y se establecieron los valores de importancia entre variables.

En esta evaluación participaron dos investigadores especialistas en el tema de incendios forestales en México y se agregó la evaluación propia. A los resultados de las ponderaciones proporcionadas por cada participante se les aplicó la prueba de consistencia interna, para evaluar los valores en función de la importancia asignada a cada variable. Los resultados individuales fueron promediados para obtener un valor único.

El segundo paso fue calcular el índice con la ecuación 1, aplicando las ponderaciones de las variables resultado del análisis jerárquico, descrito anteriormente.

$$IABIF = (B \times P_B) + \left(\frac{Rf \times P_{Rf}}{5}\right) + \left(\frac{Pf \times P_{Pf}}{5}\right) + (P_{ah} \times P_{P_{ah}}) + (Aq \times P_{Aq}) \quad (1)$$

Donde:

- IABIF = índice de amenaza a la biodiversidad por incendios forestales
- B = Biodiversidad, corresponde a la suma del número de especies en riesgo entre el máximo de la suma de especies, asume valores entre 0 y 1.
- P_i = Ponderación de la variable correspondiente.
- Rf= Respuesta de los ecosistemas al fuego.
- Pf= Presión del fuego.
- 5 = valor máximo de la variable, para ponderar.
- Pah= Proximidad a las actividades humanas. Variable binaria se asigna 1 ó 0
- Aq= Área quemada. Variable binaria se asigna 1 ó 0

RESULTADOS

Los resultados promedio de la ponderación se muestran en la tabla 1, donde se observa que las tres variables con mayor peso fueron la biodiversidad, la presión del fuego y la respuesta de los ecosistemas al fuego, presentando valores por arriba de 0.20; mientras que la probabilidad de propagación por cercanía y áreas quemadas presentaron valores por debajo de 0.10, indicando una menor importancia.

Tabla 1. Ponderación de las variables.

| Símbolo | Variable | Valor |
|-----------|--------------------------------------|-------|
| P_B | Biodiversidad (especies en riesgo) | 0.370 |
| P_{Rf} | Respuesta al fuego | 0.209 |
| P_{Pf} | Presión del fuego | 0.242 |
| P_{Pah} | Proximidad a las actividades humanas | 0.098 |
| P_{Aq} | Área quemada año anterior | 0.081 |

Fuente: Elaboración propia.

El índice de amenaza a la biodiversidad por incendios forestales (IABIF) tiene valores que van de cero a uno, donde uno corresponde a las zonas con mayor amenaza a la biodiversidad ante la ocurrencia de incendios forestales, porque habitan especies en riesgo de extinción que requieren de protección y se verían seriamente afectadas ante la reincidencia de incendios forestales. En México el índice asumió valores entre 0.005 y 0.922, con una media de 0.30, que indica valores bajos en general. La distribución de frecuencia muestra dos máximos, uno por debajo de la media y el otro alrededor de la media. Los máximos corresponden a la distribución de la variable Respuesta de los ecosistemas al fuego (Rf).

La distribución espacial del IABIF se muestra en la figura 1. La clasificación en cinco grupos se realizó con el método de ruptura natural de datos. Los valores más bajos (≤ 0.242 , en verde oscuro) representan 41% del territorio, predominan principalmente desde el sur hasta el norte del país, coincidiendo con las áreas agrícolas y pecuarias, así como con áreas de escasa vegetación, donde el número de especies en riesgo es menor. Estos valores corresponden al primer máximo del histograma.

El siguiente bloque de valores (0.242 – 0.329, en verde claro) coincide, en general, con la vegetación de zonas templadas, como los bosques predominantes en los sistemas montañosos del país. Además de algunos matorrales de la península de Baja California y área centro-norte del país, representa 22% de la superficie. Las áreas agropecuarias de los estados de Veracruz, Tabasco y norte de Yucatán presentan estos valores, lo que se debe a la variable de biodiversidad, toda vez que potencialmente pueden encontrarse algunas especies en riesgo por las características ambientales predominantes.

Figura 1. Distribución espacial del IABIF.



Fuente: Elaboración propia.

El tercer bloque de valores (0.329 – 0.404, en amarillo) abarca 23% del territorio, sigue el patrón de distribución de algunos matorrales de zonas secas, como en la altiplanicie mexicana y la península de Baja California; de igual manera con la distribución del bosque tropical (que incluye los tres tipos de selvas) como en el barlovento de las sierras, la depresión del río Balsas y en la península de Yucatán.

El penúltimo bloque de valores (0.404 a 0.534, en color naranja) representa 11% del territorio y se distribuye principalmente en el centro y sur del país. En general, rodea el rango de valores del bloque anterior, debido a la variable de proximidad a las actividades humanas. Caracteriza a tres sitios conservados como son: los Chimalapas entre los estados de Oaxaca y Chiapas, Montes Azules en el estado de Chiapas y sur del Calakmul en Quintana Roo. En estas zonas se localiza el bosque tropical más húmedo, además obedece a la distribución de las especies en riesgo, como en el barlovento de los sistemas montañosos del oriente del país, donde se observa una franja más o menos continua con orientación norte – sur.

Los valores más altos (> 0.534, en rojo) cubren 3% del territorio y se encuentran distribuidos principalmente en el oeste, sur y sureste del país. Este es el bloque donde las tres variables de la acción del fuego juegan un papel importante, porque coincide con las áreas con mayor presión del fuego, proximidad a las actividades humanas y áreas quemadas del año inmediato anterior.

REFLEXIONES FINALES

El índice define espacialmente las áreas donde existe un impacto potencial de los incendios forestales en la biodiversidad porque, ante la presencia del fuego, se incrementa el riesgo de perder especies y sus funciones en los ecosistemas naturales, especialmente de las especies categorizadas en riesgo, que se encuentran en el límite entre la pérdida y la conservación, por lo que un evento extremo puede ser uno de los posibles detonantes de su extinción.

El mapa obtenido proporciona un marco general de la amenaza que existe a nivel país y, por lo tanto, permite identificar grandes zonas que ameritan una atención especial; pero, también es posible mejorarlo y complementarlo conforme avance el conocimiento sobre el régimen y comportamiento del fuego a nivel local. La falta de conocimiento de la respuesta al fuego a nivel de especie hace que se generalice el análisis por ecosistema, por lo que es necesario hacer estudios a nivel local, que permitan diferenciar y caracterizar mejor los ambientes pirodiversos y determinar las consecuencias o beneficios en la biodiversidad.

Agradecimientos

Se agradece la colaboración de los doctores Flores-Garnica J. G. y Rodríguez-Trejo, D.A. en la ponderación de variables.

REFERENCIAS

Blankenship, K., Shlisky, A., Fulks, W., Contreras, E., Johnson, D., Patton, J., Smith, J. y Swaty, R. (2007). *An Ecological Assessment of Fire and Biodiversity Conservation Across the Lower 48 States of the U.S. Global Fire Initiative*. Global Fire Initiative Technical Report 2007-1. Arlington, VA: The Nature Conservancy.

- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (2016). La biodiversidad en México, aspectos clave y estado de conocimiento. *En Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México y Plan de Acción 2016 -2030* (pp. 31 -37). Ciudad de México: Conabio.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (2020). *Categorías de riesgo en México*. <https://www.biodiversidad.gob.mx/especies/catRiesMexico.html>
- Comisión Nacional Forestal (Conafor). (2020). *Reporte semanal de incendios 2020*. <https://www.gob.mx/conafor/documentos/reportesemanal-de-incendios>
- Chuvieco, E., Giglio, L. y Justice, C. (2008). Global characterization of fire activity: toward defining fire regimes from Earth observation data. *Global Change Biology*, 14, 1488-1502.
- Chuvieco, E. (2009). Global Impacts of Fires. En E. Chuvieco (Ed.), *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystem* (pp. 1-10). Berlín, Alemania: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01754-4_1
- Chuvieco, E., Martínez, S., Román, M. V., Hantson, S. y Pettinari, M. L. 2014. (2014). Integration of ecological and socio-economic factors to assess global vulnerability to wildfire. *Global Ecology and Biogeography*, 23, 245-258. <https://doi.org/10.1111/geb.12095>
- Flores-Garnica, J. G. (2009). El papel del fuego en la dinámica de los ecosistemas forestales. En J. G. Flores (coord.), *Impacto ambiental de incendios forestales* (pp. 39-48). México: Mundi prensa, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) - Colegio de Posgraduados.
- Flores-Garnica, J. G. y Benavides-Solorio, J. D. (2009). Efecto del fuego en la regeneración natural de ecosistemas forestales. En J. G. Flores (coord.), *Impacto ambiental de incendios forestales* (pp. 141-152). México: Mundi-prensa, Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) - Colegio de Posgraduados.
- Flores, J. G., Benavides, J. de D., Leal, H. J., Vega, D. G., Valdez, C. y Casillas, U. D. (2016). *Descripción de variables para definición de peligro de incendios forestales en México*. Tepatitlán de Morelos, Jalisco: SAGRAPA-INIFAP.

- He, T., Lamont, B. B. y Pausas, J. G. (2019). Fires as a key driver of Earth's biodiversity. *Biological Reviews*, 99, 1983-2010. <https://doi.org/10.1111/brv.12544>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2021). *Población total por entidad federativa y grupo quinquenal de edad según sexo, serie de años censales de 1990 a 2020*. http://en.www.inegi.org.mx/app/tabulados/interactivos/?pxq=Poblacion_Poblacion_01_e60cd8cf-927f-4b94-823e-972457a12d4b
- Jardel-Peláez, E. J., Pérez-Salicrup, D., Alvarado, E. y Morfín-Ríos, J. E. (2014). *Principios y criterios para el manejo del fuego en ecosistemas forestales*. Jalisco, México: Comisión Nacional Forestal.
- Myers, R. L. (2006). *Living with Fire – Sustaining Ecosystem & Livelihoods, Through Integrated Fire Management*. Florida, EUA.: The Nature Conservancy.
- Pérez-Cabello, F., Echeverría, M. T., Ibarra, P. y de la Riva, J. (2009). Effects of Fire on Vegetation, Soil and Hydrogeomorphological Behavior in Mediterranean Ecosystem. En E. Chuvieco (Ed.), *Earth Observation of Wildland Fires in Mediterranean Ecosystem* (pp. 111-128). Berlín, Alemania: Springer-Verlag Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01754-4_1
- Pimm, S. L., Alves, M. A. S., Chivian, E. y Bernstein, A. (2015). ¿Qué es la biodiversidad? En E. Chivian y A. Bernstein (coords.), *Preservar la vida, de cómo nuestra salud depende de la biodiversidad* (pp. 27 - 58). México: Fondo de Cultura Económica – Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Rodríguez, P., Jiménez-Cruz, M., Moreno-Almeraya, N. y Munguía-Carrara, M. (2021). *Mapa potencial de especies en riesgo de extinción en México, escala 1:1 000 000*. Ciudad de México, México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- Rodríguez-Trejo, D. A., Castro-Solís, U. B., Zepeda-Bautista, M. y Carr, R. J. (2007). First year survival of *Pinus hartwegii* following prescribe burns at different intensities and different seasons in central Mexico. *International Journal of Wildland Fire*, 16, 54-62. <https://doi.org/10.1071/WF05061>
- Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). *Incendios de vegetación, su ecología, manejo e historia*. Guadalajara, México: Biblioteca básica de agricultura.

Saaty, T. L. (2008). Decision making with the analytic hierarchy process. *International Journal Services Sciences*, 1 (1), 83-98. <https://www.inderscienceonline.com/doi/10.1504/IJSSci.2008.01759>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2010). *Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010, Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión y cambio-Lista de especies en riesgo*. Diario Oficial de la Federación, 30 de diciembre de 2010.

Thompson, M. P., Calkin, D. E., Finney, M. A., Ager, A. A. y Gilbertson-Day, J. W. (2011). Integrated national-scale assessment of wildfire risk to human and ecological values. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 25, 761-780. <https://doi.org/10.1007/s00477-011-0461-0>

PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DE INCENDIOS FORESTALES BAJO CONDICIONES DEL ENOS EN GUANAJUATO

Michelle Farfán Gutiérrez*, Christian Domínguez Sarmiento**,
Alejandra Espinoza Maya*, Alejandro Jaramillo Moreno**,
Camilo Alcántara Concepción*, Israel Tovar Orenday* y Alejandro Flamenco Sandoval*

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales desempeñan un papel importante en la estructura y el funcionamiento de muchos ecosistemas, con un impacto considerable en la vegetación y las sociedades humanas (Naveh 1994; Pyne, Andrews y Laven, 1996). Sin embargo, las actividades antrópicas relacionadas con el uso del suelo y la gestión de los incendios han alterado los regímenes de incendios forestales tanto a escala local como global (Martínez, Vega-García y Chuvieco, 2009; Farfán y cols., 2018).

Además del componente antrópico, la variabilidad climática afecta significativamente al número y extensión de los incendios forestales, ya que modula factores naturales como la disponibilidad de combustible, la temperatura, la precipitación, el viento y la humedad (Westerling y cols., 2003). Un ejemplo de fenómeno climático interanual es El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), en el cual las temperaturas de la superficie del

* Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Universidad de Guanajuato.

** Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México.

mar (TSM), localizadas principalmente en el Océano Pacífico Medio (OPM), fuerzan las circulaciones atmosféricas circundantes.

El ENSO tiene importantes efectos globales sobre el ciclo hidrológico, la agricultura, los ecosistemas, la salud y la sociedad (Rojo, Mesa y Lall, 2020); comprende dos fases activas denominadas El Niño (la fase cálida, caracterizada por anomalías positivas en las TSM sobre el OPM) y La Niña (la fase fría, representada por anomalías negativas en las TSM sobre el OPM) y una fase inactiva o neutral. Las dos fases activas son importantes impulsoras de las condiciones atmosféricas estacionales e interanuales sobre las zonas tropicales y subtropical de América (Domínguez, Jaramillo y Cuéllar, 2020).

En general, El Niño produce períodos secos más fuertes y prolongados sobre las Américas tropicales, mientras que La Niña amplifica las precipitaciones y los flujos máximos sobre dicha región (Poveda y Mesa 1996; Magaña, Vázquez, Pérez y Pérez, 2003). Estos eventos ocurren irregularmente en intervalos que van de 2 a 7 años, pero, generalmente fluctúan entre 3 y 4 años, y su duración puede ser de hasta 18 meses (Trenberth, 1991).

El efecto del ENSO en el territorio mexicano es ampliamente heterogéneo. Por ejemplo, El Niño puede aumentar las precipitaciones acumuladas de lluvias en algunas regiones durante el invierno o el verano, mientras que otras regiones pueden experimentar sequías extremas en la misma fase (Cavazos y Hastenrath, 1990).

Los episodios de El Niño de 1986-1987 y 1997-1998 provocaron la pérdida forestal de 800,000 ha en promedio (Semarnap, 1999; Román-Cuesta, 2000). El Niño 1997-1998 no tuvo precedentes en México en cuanto a número de incendios, biomasa y áreas quemadas, contaminación atmosférica y pérdida de bomberos (Rodríguez-Trejo, Martínez-Muñoz y Martínez-Lara, 2019); incluso algunas regiones ubicadas más al norte de México se incendiaron. Esto último señala la importancia de investigar cómo las condiciones de ENSO podrían modular los incendios forestales a escala regional en México.

Estudios anteriores han demostrado que el déficit de presión de vapor (DPV) es una variable climática que está estrechamente relacionada con la ocurrencia de incendios forestales y el tamaño de las áreas afectadas en Estados Unidos, Alaska y la región amazónica (Silvestrini y cols., 2011; Sedano y Randerson, 2014; Seager y cols., 2015; Abatzoglou y Williams, 2016). El DPV es una medida absoluta de la diferencia entre el contenido de vapor de agua en el aire y su valor de saturación. Esta variable es también una métrica precisa para calcular hasta qué punto la atmósfera puede extraer humedad

de la superficie terrestre (Seager y cols., 2015).

Debido a que no existen investigaciones previas en México que hayan evaluado el DPV relacionado con la ocurrencia de incendios, el presente estudio tiene como objetivo valorar la influencia de la variabilidad del DPV asociado al ENSO en la ocurrencia de incendios forestales. Para ello, se tomó como caso de estudio el estado de Guanajuato, una región semiárida de México, y se desarrolló un modelo de probabilidad climática para la ocurrencia de incendios forestales, considerando valores de DPV bajo diferentes condiciones de ENSO para el periodo 1998-2019.

MÉTODO

Área de estudio

Guanajuato es un estado ubicado en el centro de México, entre los 21° 51' - 19° 55' de latitud norte (N) y los 99° 40' - 102° 06' de longitud oeste (W), con una extensión de 30,617.6 km² (figura 1). La altitud oscila entre los 640 y los 3,320 m.s.n.m. con grandes variaciones topográficas en la región noreste. El clima va desde el semiárido en la región norte (precipitaciones acumuladas de 300 a 500 mm) hasta el subhúmedo cálido en el suroeste (precipitaciones acumuladas de 500 a 700 mm). Aproximadamente el 37% de la superficie del estado está cubierta por bosques tropicales y vegetación templada y xerófila (Semarnat, 2015) que, en este estudio, agrupamos en una sola categoría como “bosque”.

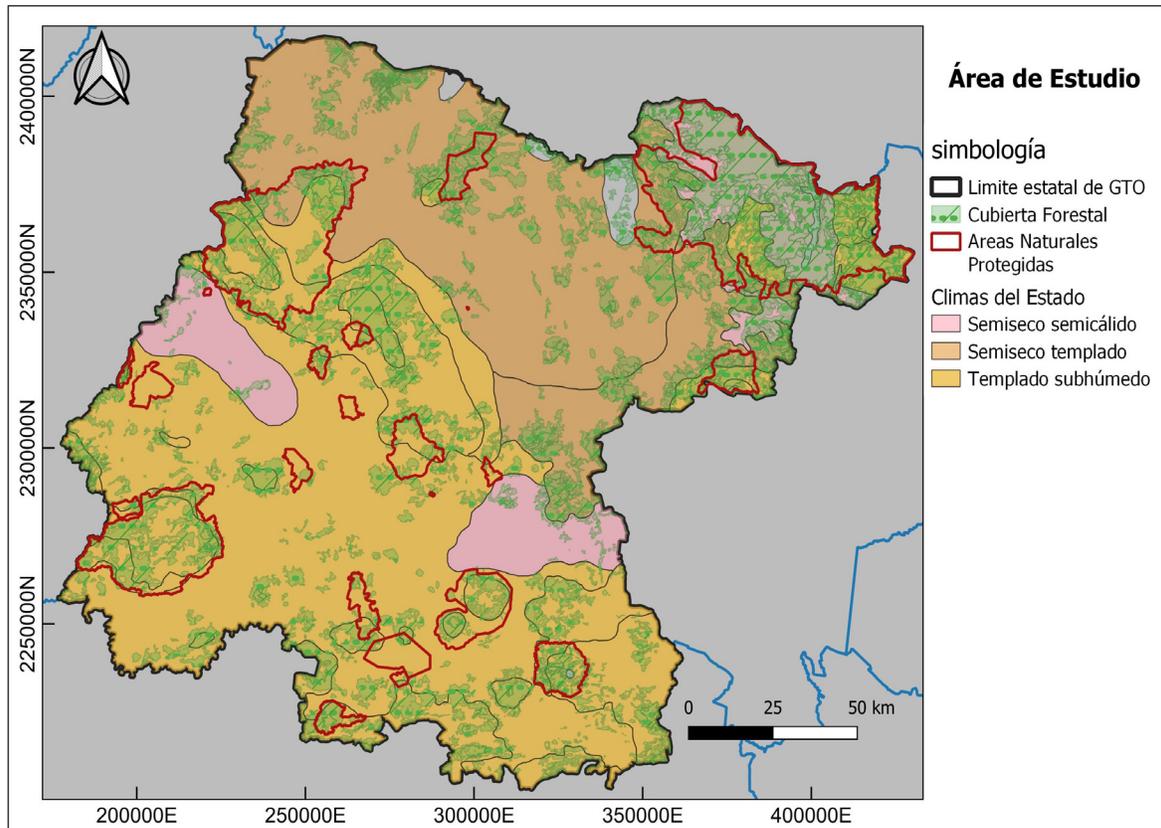
En la figura 1, además del límite territorial del estado de Guanajuato en el territorio nacional y la distribución de los climas, se muestra la cubierta forestal (en verde), las zonas urbanas (en negro), y los límites de las áreas naturales protegidas (en rojo).

Guanajuato cuenta con 23 áreas naturales protegidas (ANP) y una reserva de la biosfera, la Sierra Gorda de Guanajuato, con aproximadamente 12.5% de la cobertura forestal. No obstante, la mayoría de las comunidades vegetales de la región han sufrido profundos cambios en su estructura, composición florística y fisonomía (Zamudio, 2012), de tal forma que sus áreas de distribución se han reducido paulatinamente.

Actualmente, 63% del territorio se ha transformado en zonas agrícolas, asentamientos humanos y áreas desprovistas de vegetación. Particularmente, la región sur del estado, conocida como el Bajío de Guanajuato, que se ha caracterizado por un importante desarrollo agrícola iniciado desde la conquista española (Conabio, 2012). Los factores

responsables de la destrucción de las áreas forestales siguen presentes y la ocurrencia de incendios forestales no sólo es información esencial para la gestión de riesgos, sino también significativa desde una perspectiva climática.

Figura 1. Ubicación del estado de Guanajuato.



Fuente: Elaboración propia.

Ocurrencia de incendios y área quemada

Los puntos calientes del espectrorradiómetro de imágenes de resolución moderada (MODIS) se utilizan ampliamente para definir la ubicación de los incendios forestales (Vadrevu, Eaturu y Badarinath, 2010; Eskandari, Pourghasemi y Tiefenbacher, 2020). Para este estudio se descargaron las ubicaciones de los incendios MODIS para el periodo 2000-2019 de NASA (2021). Posteriormente, se extrajeron los incendios ocurridos en regiones cubiertas sólo por bosques para asegurar que los incendios agrícolas no fueran incluidos en el análisis.

Dado que no hay puntos calientes MODIS disponibles para años anteriores al 2000,

se utilizaron imágenes Landsat 5 TM para analizar las zonas forestales quemadas para 1998 y 1999. Las imágenes fueron descargadas de la plataforma Earth Explorer de la USGS (2021). Para cubrir el estado de Guanajuato, se utilizaron cuatro escenas de aproximadamente 185 km × 185 km cada una, con un nivel de procesamiento L1T, ortorectificado. La resolución espacial de las bandas del sensor fue de 30 metros. Para los dos años seleccionados se utilizaron 42 imágenes para los meses de marzo, abril, mayo y junio.

Datos climáticos

Se emplearon los datos del Reanálisis Europeo de Quinta Generación (ERA5), creado por el Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés). Este integra observaciones de la atmósfera a varias alturas, del océano y de la tierra mediante su asimilación en una malla global, desde 1950 hasta el presente. Las resoluciones temporal y espacial son de 1 hora y 31 km, respectivamente (ECMWF, 2021).

Las variables meteorológicas utilizadas fueron: la temperatura a 2 m, la temperatura del punto de rocío a 2 m, la humedad relativa a 2 m (obtenida a partir de la temperatura del punto de rocío), la evaporación de la parte superior del dosel, la evaporación de la transpiración de la vegetación, la evaporación total y la precipitación acumulada de marzo a mayo durante el periodo 1998-2019 para examinar cómo las fases del ENSO modulan las condiciones ambientales favorables para la ocurrencia de incendios forestales en Guanajuato.

Modelo de probabilidad de incendios forestales

Un número importante de estudios previos que relacionan el clima con la incidencia de los incendios forestales han demostrado que el déficit de presión de vapor (DPV) es más relevante que la precipitación, la temperatura, el viento o el índice de sequía, para determinar la ocurrencia de incendios (Anderson, 1936; Silvestrini y cols., 2011; Seager y cols., 2015; Brando y cols., 2020). Además, se ha demostrado que las anomalías del DPV están estrechamente relacionadas con la ignición del fuego, el crecimiento de este y el área quemada (Sedano y Randerson, 2014).

Para calcular la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales bajo la condición ENSO se seleccionó la DPV como la variable más importante, la cual se calculó a partir de la ecuación 1:

$$DPV = \left(1 - \frac{HR}{100}\right)PVS \quad (1)$$

Donde:

- HR es la media mensual de la humedad relativa (en porcentaje)
- PVS es la presión de vapor de saturación (en Pa) para la temperatura máxima mensual (Tmax) en °C, dada por la ecuación 2 de Clausius-Clapeyron (Bolton, 1980):

$$PVS = 6.112 \exp\left(\frac{17.67 T_{\max}}{T_{\max} + 243.5}\right) \quad (2)$$

Se ajustó un modelo logístico para cada mes de la estación seca (marzo, abril y mayo) para los puntos calientes de MODIS utilizando el DPV como variable explicativa para cada año, dependiendo de la fase ENSO. Debido al limitado número de incendios, se seleccionaron sólo tres años para la fase de El Niño (1998, 2016 y 2019), tres para La Niña (1999, 2008 y 2011) y sólo un año para la fase Neutral (2009), pues los demás años no tienen registros. El modelo logístico utilizó la ecuación 3:

$$Pcl(x,y)_{i,j} = \frac{e\beta_{0i} + \beta_{1i}DPV(x,y)_{i,j}}{1 + e\beta_{0i} + \beta_{1i}DPV(x,y)_{i,i}} \quad (3)$$

Donde:

- $Pcl(x,y)_{i,j}$ representa la probabilidad de un píxel caliente, dado el DPV en la celda (x,y) en el mes i y el año j.
- β_{0i} y β_{1i} son los parámetros de la regresión logística para el mes i.

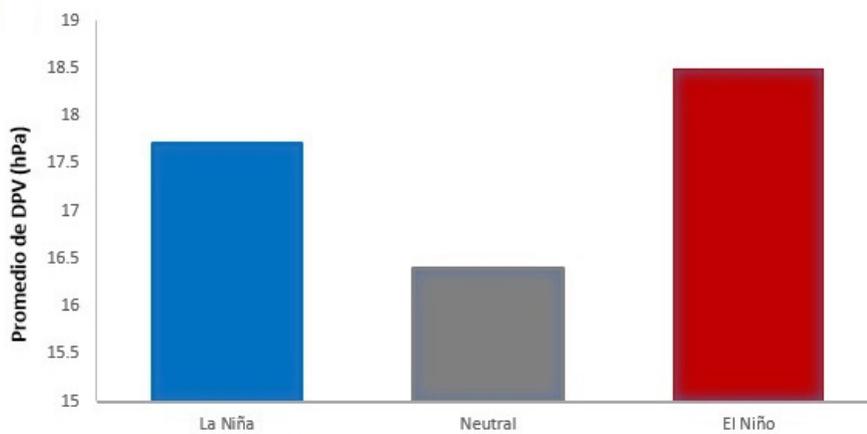
Evaluación del mapa de probabilidad

Se empleó la prueba estadística ROC para evaluar la eficacia del modelo de predicción de la probabilidad de ocurrencia de incendios, utilizando el submodelo desarrollado en el programa Dinámica EGO (CSR-UFGM, 2016). El ROC mide la precisión del modelo comparando el mapa de probabilidades de firmas predichas con el mapa binario de firmas quemadas *vs* no quemadas de los años 2016 y 2019 para condiciones de El Niño, y de 2008 y 2011 para condiciones de La Niña.

RESULTADOS

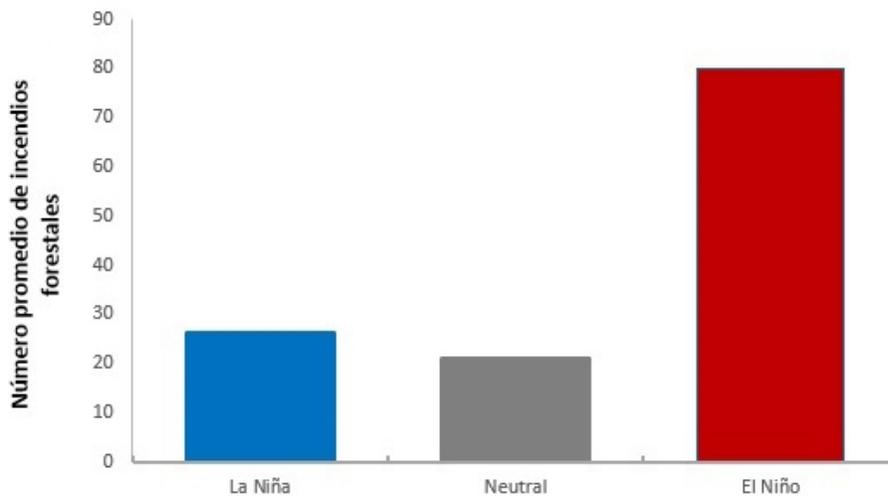
Las figuras 2 y 3 muestran el promedio multianual del DPV, así como el número promedio de incendios en el periodo estudiado (1998-2019), en la región en estudio. Tanto las fases de El Niño y La Niña inducen condiciones climáticas secas sobre la región, pero la fase de El Niño es más extrema que La Niña (figura 2), lo que provoca un mayor número de incendios forestales (figura 3). Se seleccionó el DPV como la variable más importante para calcular la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales en condiciones ENSO.

Figura 2. Promedio multianual del DPV de la estación seca en las fases del ENSO (DPV).



Fuente: Adaptada de Farfán y cols. (2021).

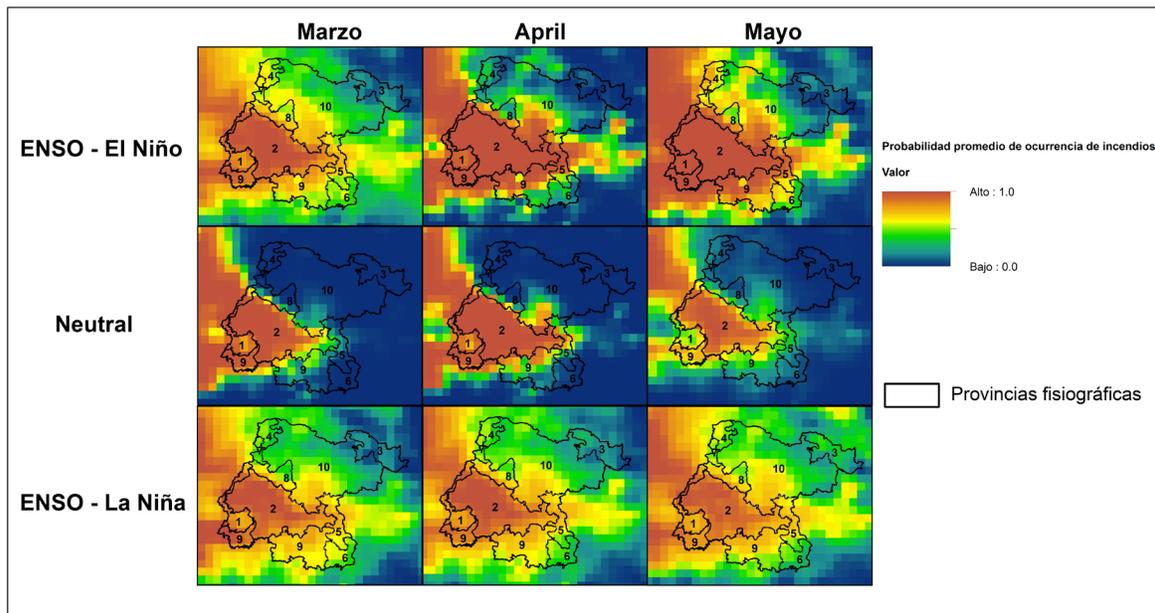
Figura 3. Número de incendios forestales por fase ENSO durante el periodo 1998-2019.



Fuente: Adaptada de Farfán y cols. (2021).

En la figura 4 se muestra la probabilidad media de ocurrencia de incendios forestales para los meses de marzo, abril y mayo según las fases ENSO El Niño (arriba), Neutral (centro) y La Niña (abajo). Los números corresponden a las siguientes provincias físico-geográficas: 1. Altos de Jalisco, 2. Bajío Guanajuatense, 3. Carso Huasteco, 4. Llanuras de Ojuelos-Aguascalientes, 5. Llanuras y Sierras de Querétaro, 6. Sierras de México, 7. Sierras de México.

Figura 4. Probabilidad media de ocurrencia de incendios forestales para los meses de marzo, abril y mayo.



Fuente: Adaptada de Farfán y cols. (2021).

Los valores más altos de la probabilidad climática calculada durante El Niño y La Niña se localizan en la región suroeste, principalmente sobre la subprovincia físico-geográfica denominada Bajío Guanajuatense. Sin embargo, bajo condiciones intensas de El Niño, como los eventos de 1998 y 2016, la probabilidad de ocurrencia también se extiende a la subprovincia físico-geográfica Sierras y Llanuras del Norte de Guanajuato, principalmente en el mes de mayo, debido a las condiciones climáticas.

Se calcularon las curvas ROC para evaluar los modelos de probabilidad según la fase ENSO. Todos los modelos tienen valores superiores a 0.7 bajo la curva (AUC), lo que indica una concordancia del 70% entre las probabilidades predichas y los incendios observados para cada uno de los años de las fases del ENSO.

CONCLUSIONES

Este estudio representa uno de los primeros esfuerzos en México por analizar la relación del déficit de presión de vapor (DPV) con la ocurrencia de incendios forestales. Para tal fin se desarrolló un modelo de probabilidad climática de la ocurrencia de incendios forestales, cuya aplicación permitió demostrar la influencia de las fases del ENSO en la modulación de las condiciones climáticas que conducen a diferencias en los DPV en una región semiárida mexicana (Guanajuato y sus alrededores), considerando sólo la estación seca (marzo-abril-mayo).

En el ejercicio realizado, se encontró que las condiciones de ENSO modulan fuertemente los valores del DPV. Durante la fase de El Niño, los valores del DPV aumentan y, en consecuencia, existen condiciones ambientales más secas durante esta fase en comparación con las condiciones neutras y de La Niña, incrementando el riesgo de incendio forestal. Si bien, este trabajo tomó como caso de estudio el estado de Guanajuato, el método propuesto puede ser utilizado para generar conocimiento sobre otras regiones del país y del mundo.

Agradecimientos

Agradecemos el apoyo de la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado de la Universidad de Guanajuato por el financiamiento otorgado en el 2020.

REFERENCIAS

- Abatzoglou, J. T. y Williams, A. P. (2016). Impact of anthropogenic climate change on wildfire across western US forests. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113 (42), 11770–11775. <https://doi.org/10.1073/pnas.1607171113>
- Anderson, D. B. (1936). Relative humidity or vapor pressure deficit. *Ecology*, 17 (2), 277-282. <https://doi.org/10.2307/1931468>
- Bolton, D. (1980). The Computation of Equivalent Potential Temperature. *Monthly Weather Review*, 108 (7), 1046-1053. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1980\)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1980)108<1046:TCOEPT>2.0.CO;2)
- Brando, P. M., Soares-Filho, B., Rodrigues, L., Assunção, A., Morton, D., (...) y Coe, M. T. (2020). The gathering firestorm in southern Amazonia. *Science Advances*, 6 (2). <https://doi.org/10.1126/sciadv.aay1632>

- Cavazos, T. y Hastenrath, S. (1990). Convection and rainfall over Mexico and their modulation by the Southern Oscillation. *International Journal of Climatology*, 10 (4), 377-386. <https://doi.org/10.1002/joc.3370100405>
- Centro de Sensoramiento Remoto, Universidade Federal de Minas Gerais (CSR – UFMG) (2016). *Receiver operating characteristic (ROC) suite*. Dinamica EGO. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas, Brasil https://www.csr.ufmg.br/dinamica/dokuwiki/doku.php?id=roc_suite
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Conabio). (2012). *La biodiversidad en Guanajuato: Estudio de Estado*. Guanajuato, México: Conabio -Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato
- Dominguez, C., Jaramillo, A. y Cuéllar, P. (2020). Are the socioeconomic impacts associated with tropical cyclones in Mexico exacerbated by local vulnerability and ENSO conditions? *International Journal of Climatology*, 41 (S1), E3307-E3324. <https://doi.org/10.1002/joc.6927>
- European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF). (2021). *ERA 5: data documentation*. <https://confluence.ecmwf.int/display/CKB/ERA5%3A+data+documentation>
- Eskandari, S., Pourghasemi, H. R. y Tiefenbacher, J. P. (2020). Relations of land cover, topography, and climate to fire occurrence in natural regions of Iran: Applying new data mining techniques for modeling and mapping fire danger. *Forest Ecology and Management*, 473, 118338. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118338>
- Farfán, G. M., Salicrup, D. R. P., Sandoval, A. F., Arzeta, S. N., Mas, J. F. y Ramírez, M. I. R. (2018). Modeling anthropic factors as drivers of wildfire occurrence at the Monarch Butterfly Biosphere. *Madera y Bosques*, 24 (3), 1-15. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431591>
- Farfán, M., Domínguez, C., Espinoza, A., Jaramillo, A., Alcántara, C., Maldonado, V., Tovar, I., y Flamenco, A. (2021). Forest fire probability under ENSO conditions in a semi-arid region: A case study in Guanajuato. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193 (10), 684. <https://doi.org/10.1007/s10661-021-09494-0>
- Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L. y Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*, 42 (3), 313-330. <https://www.redalyc.org/pdf/568/56842304.pdf>

- Martínez, J., Vega-García, C. y Chuvieco, E. (2009). Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of Environmental Management*, 90 (2), 1241-1252. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.07.005>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2021). *Active fire data*. *Earth Data*. <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms/active-fire-data>
- Naveh, Z. (1994). The role of fire and its management in the conservation of Mediterranean ecosystems and landscapes. En J. M. Moreno y W.C. Oechel (eds.), *The role of fire in Mediterranean-type ecosystems* (pp. 163-185). Nueva York, EUA.: Springer.
- Poveda, G. y Mesa, Ó. J. (1996). Las fases extremas del fenómeno ENSO (El Niño y La Niña) y su influencia sobre la hidrología de Colombia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 11 (1), 21–37.
- Pyne, S., Andrews, P. y Laven, R. (1996). *Introduction to wildland fire*. Nueva York, EUA.: John Wiley.
- Rodríguez-Trejo, D. A., Martínez-Muñoz, P. y Martínez-Lara, P. J. (2019). Efectos del fuego en el arbolado de un bosque tropical de pino y en el de una selva baja caducifolia en Villaflores, Chiapas. *Ciência Florestal*, 29 (3), 1033-1047. <https://doi.org/10.5902/1980509833952>
- Rojo, J. D., Mesa, Ó. J., y Lall, U. (2020). ENSO Dynamics, Trends, and Prediction Using Machine Learning. *Weather and Forecasting*, 35 (5), 2061–2081. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-20-0031.1>
- Román-Cuesta, R. (2000). Forest fire situation in the state of Chiapas, Mexico. En J. Pugliese (Ed.), *Global Forest Fire Assessment 1990–2000* (pp. 426–437). Roma, Italia: Forest Resources Assessment, Forestry Department, FAO.
- Seager, R., Hooks, A., Williams, A. P., Cook, B., Nakamura, J. y Henderson, N. (2015). Climatology, variability, and trends in the US vapor pressure deficit, an important fire-related meteorological quantity. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 54 (6), 1121-1141. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-14-0321.1>
- Sedano, F. y Randerson, J.T. (2014). Multi-scale influence of vapor pressure deficit on fire ignition and spread in boreal forest ecosystems. *Biogeosciences*, 11 (14), 3739-3755. <https://bg.copernicus.org/articles/11/3739/2014/>

- Secretaría de Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca (Semarnap). (1999). *Informe final de la campaña de prevención y combate de incendios forestales en el estado de Chiapas. Temporada 1998–1999*. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, Mexico: Semarnap.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2015). *Inventario Estatal Forestal y de Suelos del estado de Guanajuato 2014*. México: Semarnat.
- Silvestrini, R. A., Soares-Filho, B. S., Nepstad, D., Coe, M., Rodrigues, H. y Assunção, R. (2011). Simulating fire regimes in the Amazon in response to climate change and deforestation. *Ecological Applications*, 21 (5), 1573-1590. <https://doi.org/10.1890/10-0827.1>
- Trenberth, K. E. (1991). General characteristics of El Niño-southern oscillation. En M.H. Glantz (Ed.), *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies* (pp. 13–42). Cambridge, Reino Unido; Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- United State Geological Survey (USGS). (2021). *Earth Explorer*. <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Vadrevu, K.P., Eaturu, A. y Badarinath, K.V.S. (2010). Fire risk evaluation using multicriteria analysis, a case study. *Environmental Monitoring and Assessment*, 166, 223–239. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0997-3>
- Westerling, A. L., Gershunov, A., Brown, T. J., Cayan, D. R. y Dettinger, M. D. (2003). Climate and Wildfire in the Western United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(5), 595-604. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-5-595>
- Zamudio, S. (2012). Diversidad de ecosistemas del estado de Guanajuato. En A. Cruz, E.D. Melgarejo, A.V. Contreras, M.A. González, R. Becerril, D. Guzmán y O. Báez (eds.). *La biodiversidad de Guanajuato: Estudio de Estado*. (pp. 18-65) México: Conabio - Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato.

ANÁLISIS ESPACIO TEMPORAL DE EMISIONES DE CARBONO NEGRO EN REGIONES CAÑERAS DE MÉXICO

Ángel de Jesús Quiroz Gaspar, María Guadalupe Galindo Mendoza*
y Pedro Pérez Medina**

INTRODUCCIÓN

Con casi 54 millones de toneladas, México es el sexto productor mundial de caña de azúcar. El cultivo genera ingresos anuales por 43 mil millones de pesos, 440 mil empleos directos y 2.2 millones de empleos indirectos (SIAP, 2021). El Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (Conadesuca), ha dividido al país en 7 regiones cañeras que industrializan su producción en 49 ingenios, abastecidos por cerca de 170 mil productores de caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), de los cuales 85% se tipifican como pequeños productores al contar con un promedio de 4.5 hectáreas (Conadesuca, 2021; Sader, 2020; Mugica, 2012).

A pesar de su importancia económica y social, las prácticas agrícolas, como la cosecha por el método de quema, y los procesos industriales asociados a ellas, contribuyen a la liberación de importantes emisiones de carbono negro (CN) y otros contaminantes a la atmósfera, como el CO₂, SO₂, NO_x, NMHC, CH₄ (Hernández-Garcés, Reynosa-

* Laboratorio Nacional de Geoprocesamiento de Información Fitosanitaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

** Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Valladares, Hernández-Bilbao y Canciano-Fernández, 2019). En el Inventario Nacional de Emisiones de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero (INEGYCEI) se reporta que México emitió 112, 240 toneladas de carbono negro en el año 2015 (INECC, 2015).

El carbono negro es un contaminante de vida corta que se genera por actividades naturales y antrópicas. Está constituido por partículas que se producen por la combustión ineficiente e incompleta de combustibles fósiles, leña de uso residencial, incendios forestales y quemas agrícolas y de residuos. Por su capacidad de absorción de la radiación solar, se le atribuye 16% del calentamiento global (OMS, 2015; Klimont y cols., 2017), y debido a sus características fisicoquímicas, se asocia a problemas de salud de la población que expuesta a este contaminante (Cheesman, 2004).

En México, el monitoreo de los contaminantes atmosféricos, a través del Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (Sinaica) del INECC (2021), se ha limitado a zonas muy específicas de interés, con estaciones en las ciudades más grandes del país; mientras que el monitoreo de áreas rurales ha sido prácticamente nulo, lo que incluye a las regiones cañeras.

Ante esta situación, la tecnología espacial, como la teledetección, las imágenes de satélite, los sistemas de información geográfica (SIG) y el equipamiento en campo, han resultado útiles en el mapeo y la vinculación con otras fuentes de información de grandes áreas agropecuarias a diferentes escalas de tiempo y espacio (Aguilar y cols., 2010), además de constituir la base de los llamados Análisis Espacio Temporales (AET).

El contenido de los AET toma como principal insumo o característica las imágenes de satélite y los modelos atmosféricos, los cuales, junto con las normas, programas o políticas públicas en materia de contaminación ambiental, determinan escenarios de riesgo con una base técnica y científica. El objetivo de los AET es fortalecer o apoyar las acciones, sistemas, redes y programas que tienen por objetivo controlar, mitigar y prevenir la emisión de contaminantes atmosféricos, sobre todo en áreas bajo escenarios de cambio climático.

El presente estudio tiene como propósitos: estimar las emisiones de carbono negro, caracterizar las principales fuentes de emisión de este contaminante en zonas cañeras en México, y generar escenarios espaciales de riesgo de emisiones en una escala nacional y/o regional. Lo anterior a través del análisis espacio temporal y con el apoyo de tecnología espacial (LaNGIF-Sinavef, 2012; Galindo y González, 2014). Adicionalmente, se pretende

demostrar la confiabilidad de las imágenes de satélite para su uso en la elaboración de los inventarios de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero.

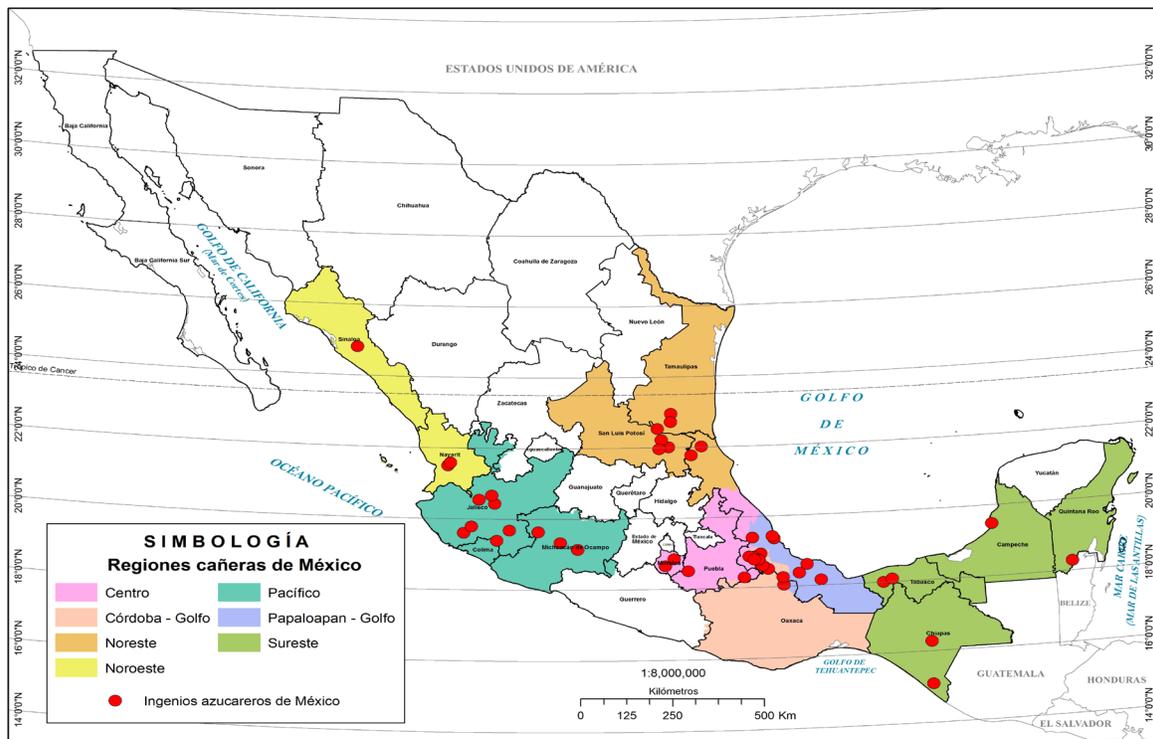
MÉTODO

Área de estudio

El área de estudio se encuentra distribuida entre los paralelos 14° y 28° de latitud norte y los meridianos 119° y 86° de longitud oeste, abarca las regiones cañeras en México, donde actualmente (zafra 2020/21) operan 49 ingenios azucareros, 7 menos que en la zafra 2010/11; lo que representa una reducción de 12% de empresas en una década (Conadesuca, 2021).

Los ingenios azucareros se distribuyen en 15 estados de la república, ubicados en las siguientes siete regiones: noroeste, noreste, pacífico, sureste, centro, Córdoba-Golfo y Papaloapan-Golfo (figura 1).

Figura 1. Regiones cañeras de México.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de Conadesuca (2021).

Insumos satelitales y modelos atmosféricos

Para llevar a cabo el proceso del análisis espacio temporal, la construcción de cartografía temática y el análisis espacial de emisiones de carbono negro, se utilizaron datos de los productos y modelos satelitales de libre acceso y uso de la Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA, por sus siglas en inglés) específicamente los de MERRA-2 (Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, NetCDF-2).

MERRA-2 es el último reanálisis atmosférico (reemplazó al MERRA original), e incluye observaciones y mejoras al sistema terrestre denominado Goddard Earth Observing System, NetCDF 5 (GEOS-5), para proporcionar un análisis climático viable y continuo (Gelaro y cols., 2017; Randles y cols., 2017) del año 1980 al presente.

Para obtener las emisiones de carbono negro por quema de biomasa se utilizó una de las variables del producto Black Carbon Biomass Burning Emissions (M2TMNXADG v5.12.4), el cual recopila datos bidimensionales y promedios mensuales, disponibles tres semanas después del último día de cada mes (GMAO, 2015).

M2TMNXADG v5.12.4 utiliza observaciones satelitales basadas en RETRO-2 (Reanalysis of the Tropospheric Chemical Composition, versión 2) y contiene un diagnóstico de aerosoles asimilados (extendidos) en los que se encuentran los componentes del carbono negro a 550 nm; así como, el depósito seco y húmedo de cada componente de aerosol, la emisión de polvo y la sedimentación.

El acceso a las variables contenidas en las colecciones de datos de los productos MERRA-2 se realizó a través de los portales web: GIOVANNI (NASA, 2021a) y MDISC (NASA; 2021b) manejado por Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC).

Preprocesamiento

Para la obtención de las imágenes y la base de datos de emisiones de carbono negro para las regiones cañeras e ingenios azucareros de México, contenidas en las colecciones del modelo MERRA-2, se empleó una serie de parámetros y de preprocesos de las imágenes. Para la descarga, se utilizó el método “Get File Subsets using the GES DISC Subsetter” para la generación de enlaces de archivos, ya que admite búsqueda y recortes geoespaciales por área definida, selección de variables, selección de rango de hora del día o mes, grid (método de interpolación) y formato.

Este método de descarga permitió, además, utilizar el subsetter y el regridded nivel 3 y 4 para buscar datos dentro de dominios temporales y espaciales especificados, para después subdividir aún más los datos espacialmente y por variable (GMAO, 2015). El rango de fecha fue en la hora UTC, desde enero de 2010 hasta la actualidad. Las regiones cañeras (área de estudio) se definieron con las coordenadas extremas que se mencionaron previamente.

Se eligió la variable de emisiones por quema de biomasa que fue BCEMBB (Black carbon biomass burning emissions) con una resolución espacial de entrada de $0.5^\circ \times 0.625^\circ$, a la que se le aplicó un remuestreo de píxeles (resampling), utilizando la interpolación del vecino más cercano propuesta por Schulzweida (2018), que es factible y adoptado en estudios de validación, para así obtener una resolución espacial final de 0.25° (aproximadamente 27 km) en formato NetCDF.

Lo anterior, permitió generar una lista de enlaces de acceso a los conjuntos de datos confiables del modelo MERRA-2 que contienen todas las variables seleccionadas con todos los parámetros configurados y adecuados (validación y calibración).

Procesamiento y análisis espectral

El análisis espectral (extracción espectral de acuerdo con metodologías y algoritmos propios del LaNGIF) se utilizó para la extracción del comportamiento temporal por región e ingenio azucarero a través del valor del píxel de carbono negro superficial mediante una malla con dimensiones de 27×27 km (729 km²), con la estructura de un cubo de datos. El primer paso fue ubicar los píxeles de las imágenes que corresponden geográficamente con los ingenios azucareros (nube de puntos) en las regiones cañeras. Posteriormente, para la representación georreferenciada en 2D de las imágenes de emisión de carbono negro, se utilizó el paquete del software Panoply versión 4.11.2 de la NASA (2022).

A partir de Panoply se desplegaron las variables seleccionadas a manera de imagen y de varios arreglos por píxel y temporalidad. Estos últimos se exportaron a una base de datos para poder analizar las variaciones temporales del carbono negro superficial durante las últimas dos zafras. La base de datos que se generó se compuso por filas y columnas; la columna representa la coordenada X del centroide del píxel y la fila, la coordenada Y. Finalmente, las imágenes mensuales de carbono negro se generaron en formato ráster, para que fueran compatibles con software SIG y poder detectar las variaciones espaciales

del contaminante por región cañera.

Análisis Espacio Temporal (AET) del carbono negro

El AET está apoyado en metodologías de referencia espacial bajo los principios geográficos de ubicación, conectividad, temporalidad y relaciones topológicas. La dimensión espacial estuvo sujeta a las diferentes escalas nacional y regional (mediana escala). El AET de emisiones de carbono negro partió de la incorporación de la componente temporal con el contexto espacial en el que se desarrolla un determinado problema, considerando aspectos como la escala de tiempo, granularidad y comportamiento de elementos clave, con el fin de delimitar escenarios espaciales de riesgo de emisiones.

Factor de emisiones en caña de azúcar

El método de factor de emisiones es el utilizado actualmente por el INECC (2015, 2016) para realizar el inventario de gases y compuestos de efecto invernadero. Esta metodología puede hacer sus estimaciones en 3 niveles de especificidad, dependiendo de la información con la que se cuente en el país y el sector en cuestión. Para el caso de las emisiones provenientes de la quema de la caña de azúcar, la estimación de emisiones se hace en un segundo nivel; es decir, con factores de emisión calculados específicamente para el país.

La metodología se fundamenta en el cálculo de las emisiones a partir de una unidad de magnitud que, en este caso, son las toneladas cosechadas de caña, bajo la siguiente fórmula:

$$E_{CN} = DA \times FE_{CN} \times \left(\frac{100 - n}{100} \right) \quad (1)$$

Donde:

- E_{CN} : es la emisión de hollín o CN de la actividad A en kilogramos.
- DA: es la actividad o magnitud sobre la cual se basa el cálculo de la emisión de GYCEI, dada en unidades de la actividad.
- FE_{CN} : es el factor de emisión de CN para la actividad A, dado en kilogramos de CN por unidades de actividad.
- n: es la eficiencia de los sistemas o equipo de control por tipo de GYCEI, si estos se encuentran instalados y operando, y es dada en porcentaje.

Tomando como base la fórmula anterior y los parámetros de la tabla 1, se simplificó la fórmula quedó de la siguiente manera:

$$E_{CN} = DA \times FE_{CN} \quad (2)$$

Donde:

- E_{CN} : es la emisión de hollín o CN de la actividad A en kilogramos.
- DA: es la actividad o magnitud sobre la cual se basa el cálculo de la emisión de GYCEI, dada en unidades de la actividad.
- FE_{CN} : es el factor de emisión de CN para la actividad A, dado en kilogramos de CN por unidades de actividad.

Tabla 1. Valores para la estimación del parámetro A para caña de azúcar.

| Parámetro | Valor |
|-----------------------------------------|-------|
| Relación residuo-cultivo | 0.200 |
| Fracción materia seca | 0.895 |
| Fracción de cultivo incinerado en campo | 0.720 |
| Factor de oxidación | 0.900 |

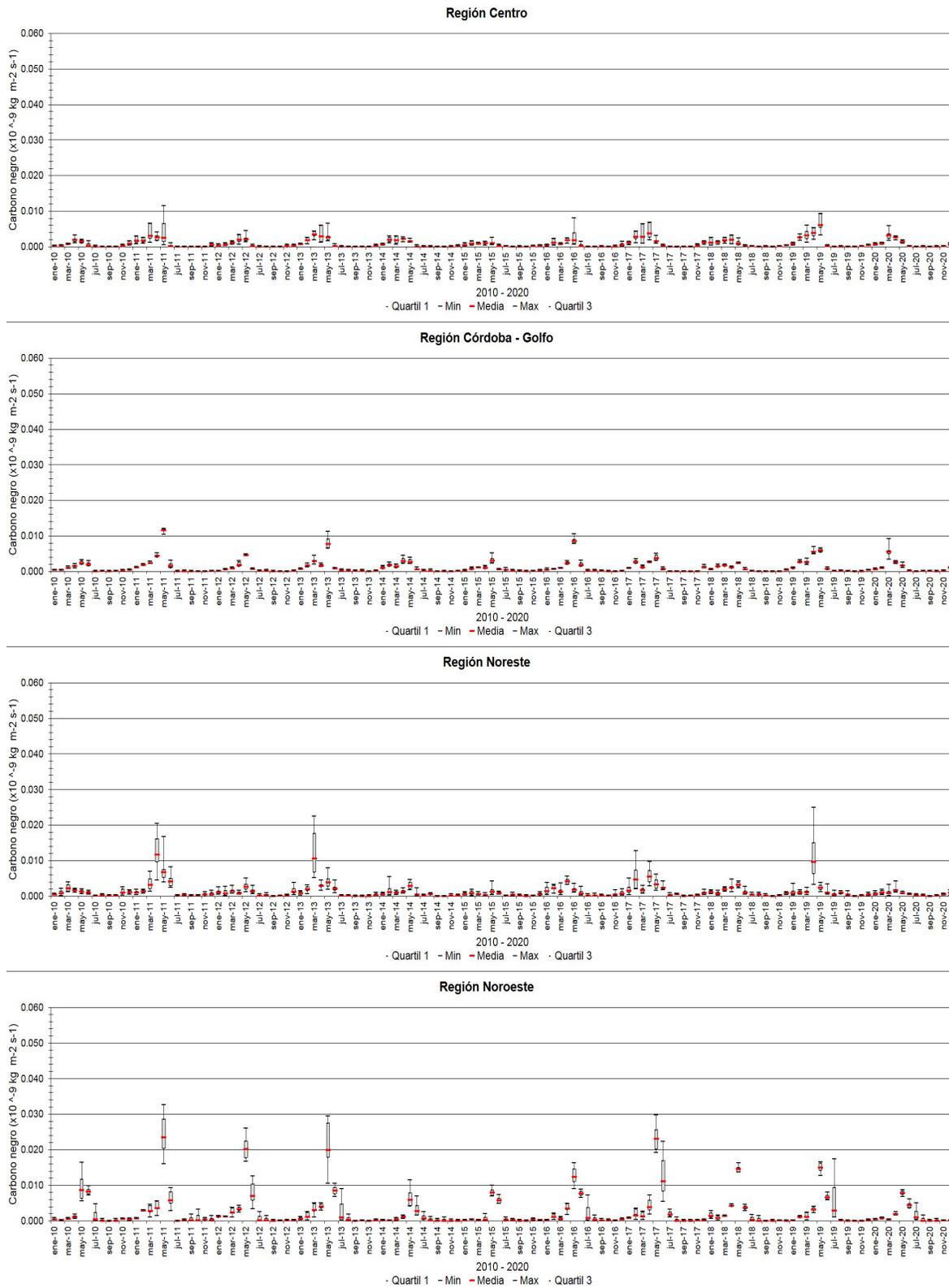
Fuente: UAM (2016).

RESULTADOS

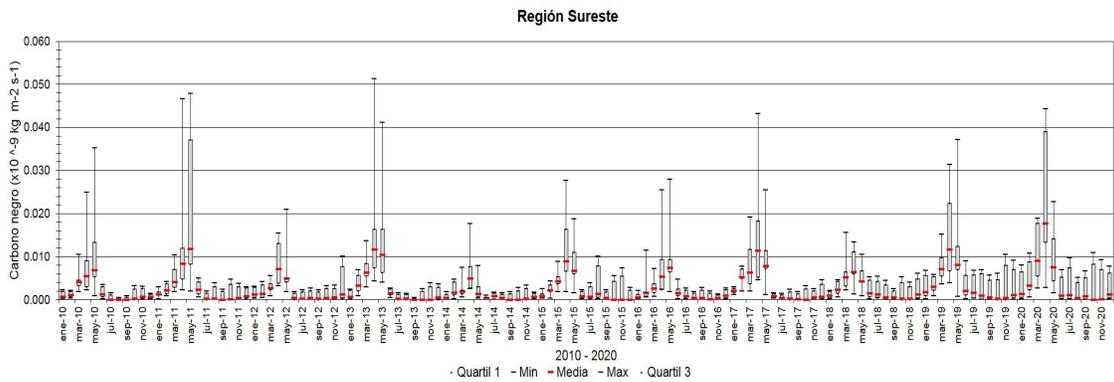
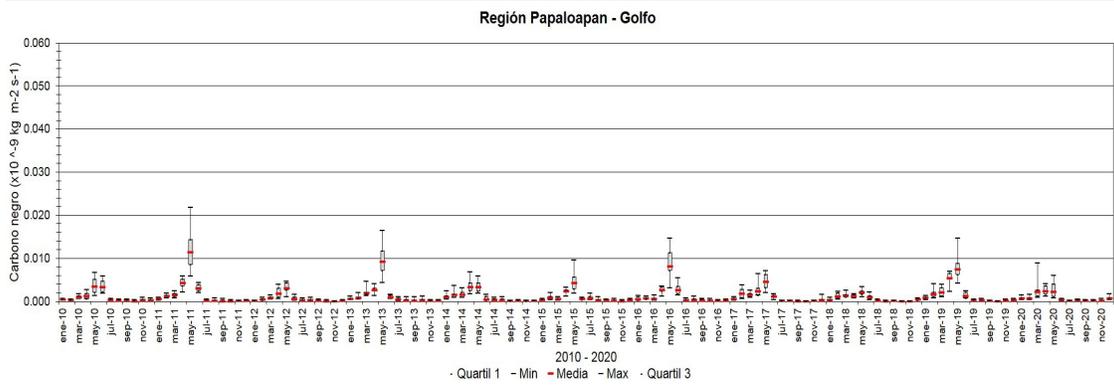
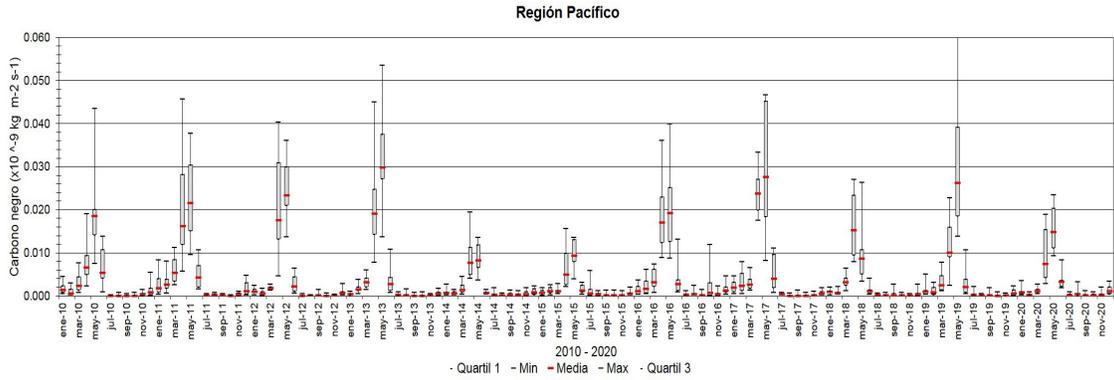
Los resultados del análisis espacio temporal de emisiones de carbono negro por quema de biomasa evidencian que, las regiones cañeras y, por lo tanto, los ingenios azucareros que más emisiones tienen hacia la atmósfera son las regiones: pacífico, sureste, noroeste y noreste, cuyos picos de máxima emisión comienzan en los meses de diciembre y enero, coincidiendo con los periodos de zafra de cada año (figura 2).

Así mismo, se estimó que las emisiones de carbono negro por quema de biomasa de caña de azúcar tienen impacto en 267 municipios rurales, en donde habitan más de 13 millones de personas en 15 estados del país, aunque el mayor impacto por exposición directa lo tienen los 182 mil productores de caña en el país, los 54 mil obreros de fábrica, los 154 mil jornaleros, los 70 mil cortadores y los 31 transportistas que se dedican a la producción de la caña de azúcar (figura 3).

Figura 2. Variación temporal de emisiones de CN por región cañera de México 2010-2020.

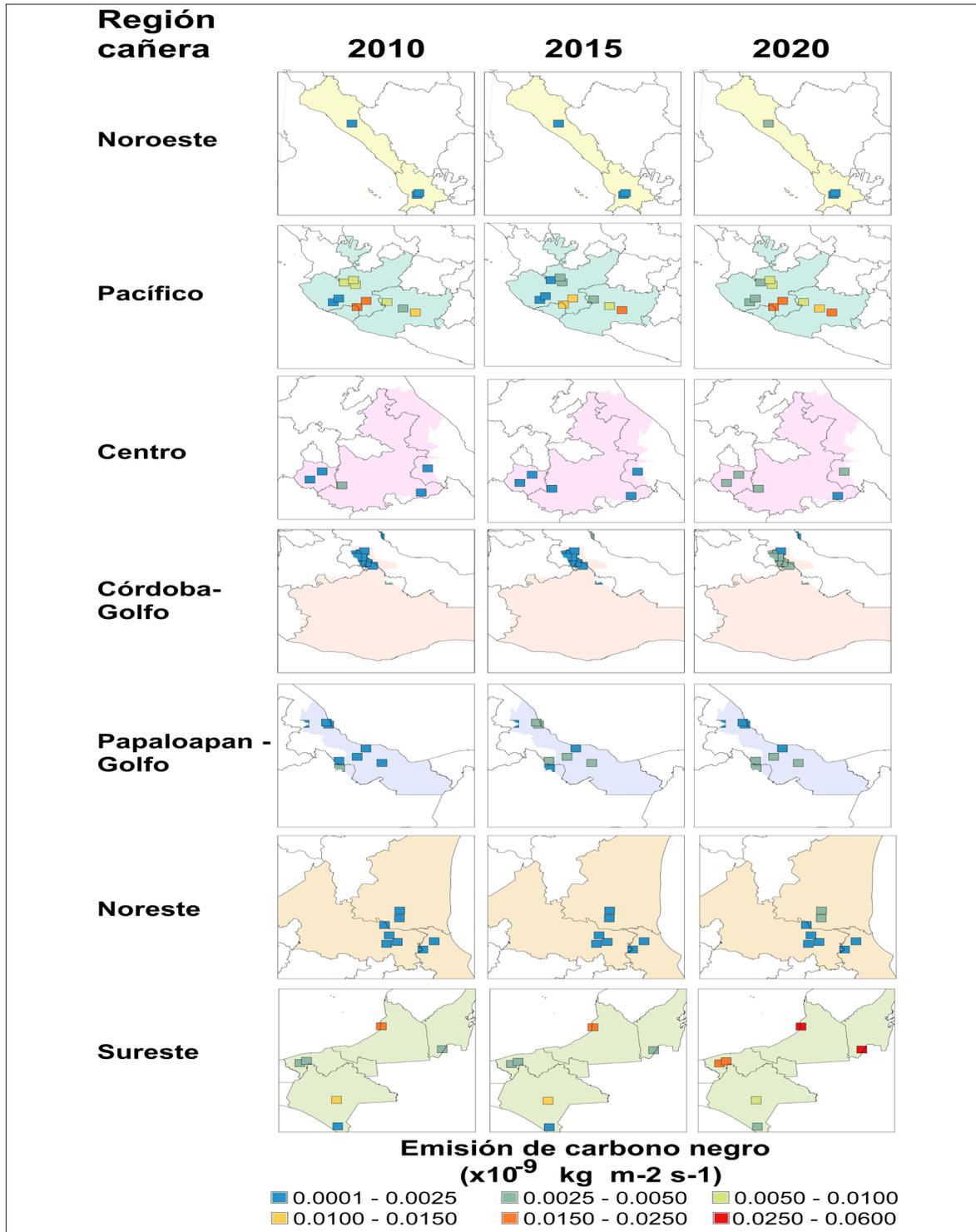


Continuación Figura 2. Variación temporal de emisiones de CN por región cañera de México 2010-2020



Fuente: Elaboración propia .

Figura 3. Emisiones de carbono negro por quema de biomasa por ingenio azucarero para abril de: 2010, 2015 y 2020.

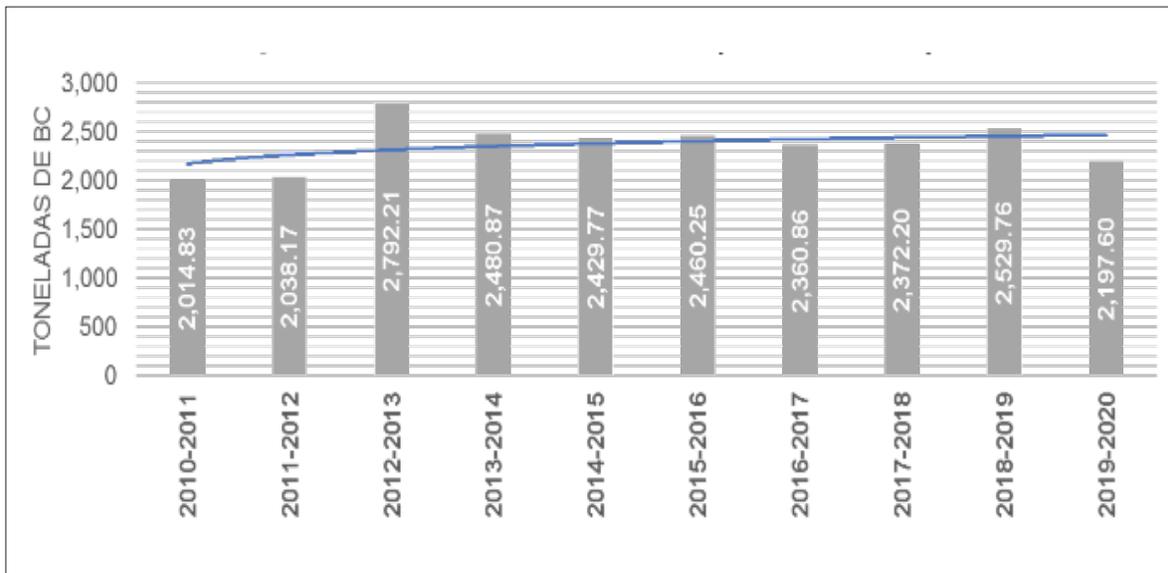


Fuente: Elaboración propia con base en datos de Conadesuca (2021).

Factor de emisiones

Según el método de factor de emisiones, las emisiones de carbono negro por quema de caña de azúcar en el país mostraron variaciones durante la última década; no obstante, tuvieron una clara tendencia al alza, registrando un incremento promedio de 17.5% en el periodo (figura 4). Lo anterior, en contraposición con la meta no condicionada que se propuso México, durante la Conferencia de las Partes de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP21), de reducir sus emisiones de carbono negro en 51% para el año 2030, con respecto a 2013.

Figura 4. Emisiones nacionales de carbono negro por quema de caña de azúcar (periodo 2010-2020).



Fuente: Elaboración propia.

Tanto las imágenes y modelos satelitales como el inventario de emisiones, muestran un escenario en el cual no se está cumpliendo la meta de reducir las emisiones de carbono negro durante los últimos 10 años. De acuerdo con la Estrategia Nacional de Cambio Climático (Semarnat, 2013), para llegar a cumplir los objetivos de las vertientes fundamentales que son: adaptación y mitigación del cambio climático, debe existir una política robusta.

REFLEXIÓN FINAL

Con base en los resultados obtenidos, se considera que el uso de imágenes satelitales y modelos atmosféricos de MERRA-2 constituyen una fuente de información confiable y calibrada para el monitoreo de la calidad del aire, la cual puede mejorar considerablemente si se realizan verificaciones en campo.

La aplicación del proceso metodológico del análisis espacial y temporal, así como de algoritmos satelitales, permitió estimar las emisiones de carbono negro hacia la atmósfera derivadas de los diferentes procesos de cosecha e industrialización del cultivo de caña de azúcar en tiempo cuasi-real.

El análisis espacial y temporal, junto con el método de factor de emisiones del Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) evidenciaron que las emisiones de carbono negro siguen incrementándose en los últimos 10 años, por lo que se sugiere, además de un monitoreo permanente del tema, la incorporación de instrumentos de gestión de la calidad del aire en las regiones donde estas emisiones se generan, como lo son las zonas cañeras del país.

A través del análisis espacial y temporal se puede tener información valiosa y oportuna para la toma de decisiones, tanto en la priorización en los procesos de monitoreo y vigilancia de contaminantes atmosféricos y gases de efecto invernadero en general como en la aplicación de medidas que permitan mejorar la calidad del aire, en cada una de las regiones cañeras y la reducción de emisiones.

Las imágenes de satélite y, en general, la tecnología espacial, pueden constituirse en importantes fuentes de información para la elaboración de los inventarios de gases y compuestos de efecto invernadero, tanto estatal como nacional, sobre todo en áreas donde no se cuenta con estaciones o equipo de monitoreo en tierra. Además, pueden ser utilizados en los sistemas de alerta, normativa y política pública que cada entidad federativa opera e implementa, especialmente en lo relacionado con el cultivo de caña de azúcar.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Fondo Sectorial de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Actividades Espaciales Conacyt-AEM por el financiamiento para el desarrollo de este trabajo que forma parte de la primera etapa del proyecto titulado “Modelo de innovación para la identificación y monitoreo de contaminantes

atmosféricos a través de tecnología espacial Conacyt-AEM-UASLP”, así también nuestro agradecimiento al Laboratorio de Geoprosesamiento de Información Fitosanitaria de la UASLP por las facilidades otorgadas en todo el desarrollo del trabajo.

REFERENCIAS

- Comité Nacional para el Desarrollo Sustentable de la Caña de Azúcar (Conadesuca). (2021). *8o informe estadístico del sector agroindustrial de la caña de azúcar en México. Zafras 2011-2012 / 2020-2021*. Ciudad de México: Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. <https://siiba.conadesuca.gob.mx/infocana/informe/informe.html>
- Cheesman, O. D. (2004). *Environmental impacts of sugar production. The cultivation and processing of sugarcane and sugar beet*. Trowbridge, Reino Unido: Cromwell Press. <https://doi.org/10.1079/9780851999814.0000>
- Galindo, M. G. y González, R. (2014). SIG-WEB inteligente: el caso del Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria en México. En UASLP, Senasica y Sagarpa (eds.), *Percepción remota y ciencias espaciales* (pp. 1-6). San Luis Potosí, México: UASLP.
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A. (...) y Zhao, B. (2017). The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30 (14), 5419–5454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1>
- Global Modeling and Assimilation Office (GMAO). (2015). *MERRA-2 tavgM_2d_aer_Nx: 2d, Monthly mean, Time-averaged, Single-Level, Assimilation, Aerosol Diagnostics V5.12.4*. Greenbelt, Maryland, EUA.: Goddard Earth Sciences Data and Information Services Center (GES DISC). <https://doi.org/10.5067/FH9A0MLJPC7N>
- Gobierno de la República (2020). *Estrategia nacional de cambio climático. Visión 10-20-40*. México, D.F.: Semarnat. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/41978/Estrategia-Nacional-Cambio-Climatico-2013.pdf>
- Hernández-Garcés, A., Reynosa-Valladares, M., Hernández-Bilbao, F. y Canciano-Fernández, J. (2019). Emisión de contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros santiagueros. *Tecnología Química*, 39 (2), 390-402. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445559634010>

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2015). *Inventario Nacional de Gases y Compuestos de Efecto Invernadero*. México: INECC.
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2016). *Determinación de factores de emisión de bióxido de carbono (CO₂), partículas en suspensión de 2.5 y 10 micras (PM_{2.5} y PM₁₀) y contaminantes de vida corta, metano (CH₄) y carbono negro por prácticas de quema agrícola*. México: Semarnat. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/290687/Factores_de_Emision_de_Quema_Agricola_CGMCC_2016.pdf
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2021). *Sistema Nacional de Información de la Contaminación del Aire*. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <http://sinaica.inecc.gob.mx/>
- Klimont, Z., Kupiainen, K., Heyes, C., Purohit, P., Cofala, J., (...) y Schöpp, W. (2017). Global anthropogenic emissions of particulate matter including black carbon. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 8681-8723. <https://doi.org/10.5194/acp-17-8681-2017>
- Laboratorio Nacional de Geoprocesamiento de Información Fitosanitaria, Sistema Nacional de Vigilancia Epidemiológica Fitosanitaria (LaNGIF-Sinavef). (2012). *Análisis Espacio Temporal de Plagas Reglamentadas. Informe técnico*. San Luis Potosí: Sinavef, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Mugica, V. (2012). *Emisiones de carbono negro en partículas atmosféricas provenientes de la quema de la caña de azúcar. Informe técnico*. Ciudad de México: Universidad Autónoma Metropolitana. <https://www.gob.mx/inecc/documentos/emisiones-de-carbono-negro-en-particulas-atmosfericas-provenientes-de-la-quema-de-la-cana-de-azucar>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2021a). GIOVANI. *The Bridge between data and Science v.4.36*. <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (2021b). *GES DISC*. Earth Data. <https://disc.gsfc.nasa.gov>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA). (NASA). (2022). *Panoply netCDF and GRIB Viewer*. Goddard Institute for Sapce Studies. <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>

- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2015). *Reducción de los riesgos sanitarios mundiales mediante la mitigación de los efectos de los contaminantes climáticos de vida corta*. <https://www.who.int/es/news-room/questions-and-answers/item/reducing-global-health-risks-through-mitigation-of-short-lived-climate-pollutants>
- Randles, C. A., Da Silva, A. M., Buchard, V., Colarco, P. R., Darmenov, A., (...) y Flynn, C. J. (2017). The MERRA-2 aerosol reanalysis, 1980 onward. Part I: System description and data assimilation evaluation. *Journal of Climate*, 30 (17), 6823-6850. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0609.1>
- Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (Sader). (2020). *Acuerdo por el que se dan a conocer los programas institucionales 2020-2024 de las entidades de la Administración Pública Paraestatal sectorizadas a la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural*. Diario Oficial de la Federación, 28 de septiembre de 2020.
- Sistema de Información Agrícola y Pesquera (SIAP). (2021). *Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIACON)*. <https://www.gob.mx/siap/prensa/sistema-de-informacion-agroalimentaria-de-consulta-siacon>
- Schulzweida, U. (2018). *CDO User Guide. Climate Data Operators, versión 1.9.5*. Hamburgo, Alemania: MPI for Meteorology. <https://doi.org/10.5281/zenodo.3539275>
- Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). (2016). *Determinación de factores de emisión de dióxido de carbono (CO₂), partículas en suspensión de 2.5 y 10 micras (PM_{2.5} y PM₁₀) y contaminantes de vida corta, metano (CH₄) y carbono negro por prácticas de quema agrícola. Informe final*. México, D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana.

EL USO DE LÍQUENES COMO BIOINDICADORES PARA LA VALIDACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE DE CONTAMINANTES ATMOSFÉRICOS EN SIERRA DE ÁLVAREZ, SAN LUIS POTOSÍ

Stacey Juruan De La Cruz Martínez y María Guadalupe Galindo Mendoza*

INTRODUCCIÓN

Los bioindicadores son organismos que reaccionan a cambios ambientales y envían señales visibles. Debido a la sensibilidad a perturbaciones ambientales con la que cuentan pueden presentar algunos cambios como los siguientes: disminuir en número, crecer o cambiar su estructura, distribución, abundancia, dispersión, éxito reproductivo, etc. Los cambios y condiciones que presentan se pueden utilizar como estimadores del estado en que se encuentran otras especies o condiciones ambientales que, en ocasiones, son difíciles, inconvenientes o costosas de medir (Celli, 1992; Heink y Kowarik, 2010; González, 2014; González y Vallarino, 2014).

En este sentido, los líquenes pueden ser utilizados como bioindicadores de contaminación atmosférica. Estos son una asociación mutualista entre un hongo y un compañero fotosintético que puede ser un alga o una cianobacteria; sin embargo, pueden ser considerados como una unidad en el ecosistema (Guzmán-Dávalos y Álvarez, 2014;

* Laboratorio Nacional de Geoprocusamiento de Información Fitosanitaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Hawksworth, Iturriaga y Crespo, 2005; Purvis, 2000). De manera regular los tejidos del hongo rodean al alga o a la cianobacteria, y con ello se determina el tipo de desarrollo que tienen, el cual puede ser en forma de costra (crustáceo), en forma de hoja (foliáceo) o de diminuto arbusto (fruticuloso) (Marsh y Grossa, 2002; Hawksworth y cols., 2005).

Es importante mencionar que el nombre que se les asigna a los líquenes es por el simbionte hongo y, por lo tanto, están clasificados dentro del reino Fungi (Herrera-Campos, Lücking, Pérez-Pérez, Miranda-González, Sánchez, Barcenás-Peña y Nash, 2014). Estos pueden ser utilizados como bioindicadores, ya que bajo la presencia de estresores aumentan su tasa de mortalidad, alteran su actividad reproductora y se da una disminución de su abundancia, dañando al componente fúngico, rompiendo la relación simbiótica y muriendo ambos organismos.

Por tal motivo, con el uso de líquenes como bioindicadores es posible detectar algunos de los contaminantes como lo son: los metales pesados, el dióxido de azufre (SO₂), los óxidos nitrosos (NO_x), el ozono (O₃), amoníaco (NH₃), gases fluorados, lluvia ácida, nitratos (NO₃) y peroxiacetilnitrato (PAN) (Guzmán-Davalos y Álvarez, 2014; Servicio Forestal de los Estados Unidos, citado en Riquelme, 2008) y con ello complementar la información obtenida por las escasas estaciones de monitoreo disponibles.

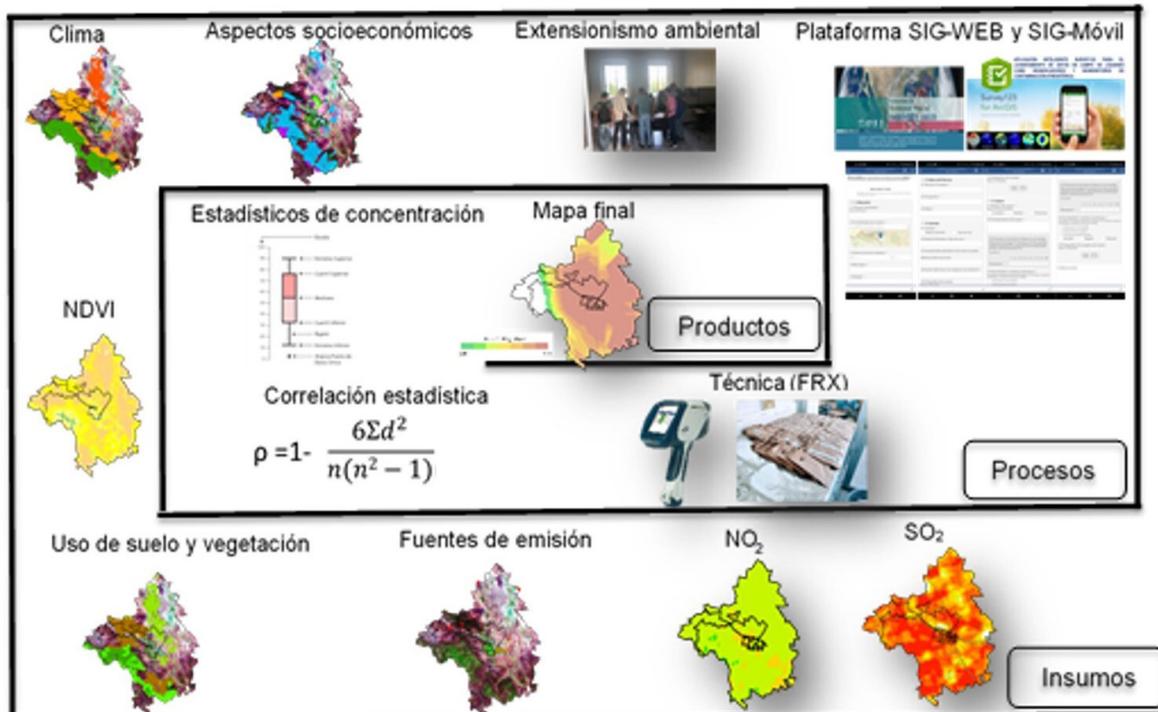
A pesar de que se conoce la importancia de los líquenes como bioindicadores, en México existen muy pocos estudios sobre ellos. Un aporte importante al conocimiento de especies del país es el estudio “diversidad de líquenes en México”, donde se considera que existen un total de 2,722 especies y 364 géneros; sin embargo, se considera que, por la diversidad climática y ecosistémica del país, podrían existir alrededor de 5,000 especies. El tipo de vegetación con mayor riqueza es el bosque templado con 947 especies, seguido del matorral xerófilo con 544, y el bosque tropical húmedo con 391 especies. Del total de especies contabilizadas se considera que San Luis Potosí cuenta con 94 (Herrera-Campos y cols, 2014).

En respuesta al escaso trabajo que se ha realizado en el monitoreo de la calidad del aire a través del uso de líquenes como bioindicadores en México, este estudio se centró en determinar los patrones espaciales de mayor contaminación atmosférica para la Sierra de Álvarez en el estado de San Luis Potosí, mediante la utilización de geotecnologías y bioindicadores.

MÉTODO

En esta sección se muestra la metodología utilizada y los resultados obtenidos para el monitoreo de la calidad del aire en Sierra de Álvarez, porción perteneciente a los municipios de Ciudad Fernández y Ríoverde en el estado de San Luis Potosí, México.

Figura 1. Metodología empleada para la validación de datos espaciales.



Fuente: Elaboración propia con base en datos de Conadesuca (2021).

La investigación se realizó en tres fases (figura 1). En la primera, se llevaron a cabo los diagnósticos físico-biológico y socio-económico de la zona de estudio; y se elaboró un mapa de riesgo de contaminación atmosférica que, a su vez, se utilizó para determinar los lugares donde se llevaría a cabo el muestreo de especies de líquenes.

Se realizó el análisis espacio-temporal para los contaminantes: Dióxido de Azufre (SO₂) y Dióxido de Nitrógeno (NO₂), a partir de los datos espaciales del sensor denominado Tropomi (Tropospheric Monitoring Instrument). Al respecto, cabe aclarar que el satélite Sentinel-5P, fue lanzado en 2017 por la Agencia Espacial Europea, como parte del programa Copérnico, con el objetivo de monitorear la atmósfera. El satélite lleva el instrumento Tropomi que permite mapear múltiples gases que afectan la calidad del aire (ESA, 2017, 2021).

En la segunda fase se empleó la metodología Investigación Acción Participativa, debido a que permite tener una vinculación con personas que son originarias del área de estudio (Ander-Egg, 1990). Los datos tomados por los técnicos de campo se recopilaban a través de la app ArcGis Survey 123 y se vaciaron a una plataforma SIGWeb en tiempo real. Los parámetros dentro de los cuales estuvieron guiadas las exploraciones y el muestreo de las especies de líquenes se basó en los manuales de muestreo específicos para líquenes de SSF (s.f.), Denison y Carpenter (1973), y Mostacedo y Fredericksen (2000).

En la última fase se estimaron las concentraciones de metales pesados de las muestras de líquenes a través del uso de la técnica fluorescencia de rayos X (FRX), la cual es una técnica analítica instrumental no destructiva que mide la composición elemental de una sustancia, generalmente sólida, al ser expuesta a una radiación de rayos X (Gutiérrez-Ginés y Ranz, 2010). Además, se calculó el coeficiente de correlación de rangos de Spearman (ρ) para determinar el grado de asociación entre lo encontrado en las muestras de líquenes y los datos provenientes de las imágenes de satélite (ecuación 1).

$$\rho = 1 - \frac{6\sum d^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

Donde:

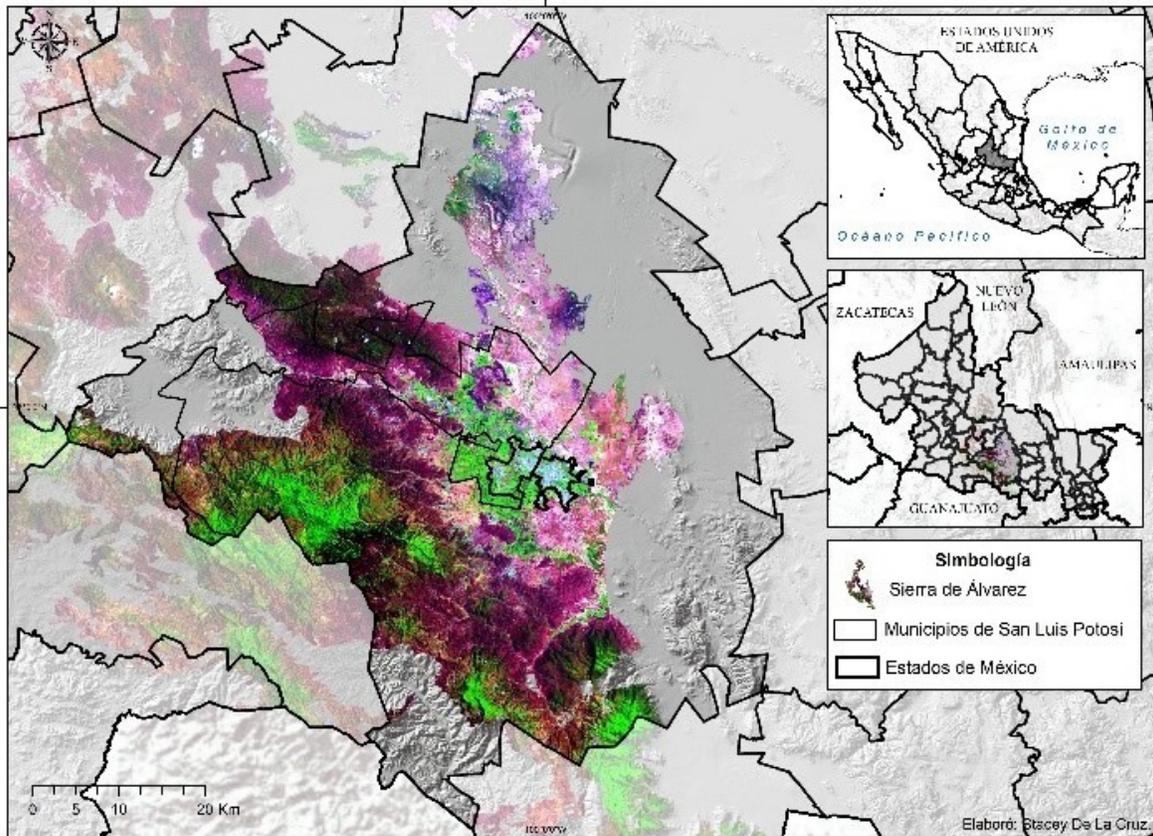
- ρ = Coeficiente de correlación de Spearman,
- d = Diferencia entre los correspondientes datos de orden X-Y,
- n = número de pareja de datos.

RESULTADOS

La Sierra de Álvarez se encuentra localizada dentro de los municipios de Armadillo de los Infante, Cerro de San Pedro, Cerritos, Ciudad Fernández, Guadalcázar, Río Verde, San Nicolás Tolentino, San Ciro de Acosta, Santa María del Río, Tierra Nueva, Villa Hidalgo, Villa Juárez y Zaragoza (figura 2); dentro de las coordenadas: 21° 42' 32" a 22° 23' 21" de latitud norte y 100° 48' 30" a 100° 49' 30" de longitud oeste. Cuenta con dos áreas naturales protegidas de carácter federal en la categoría de área de protección de flora y fauna, así como de parque nacional.

La Sierra de Álvarez presenta climas: seco semicálido, seco templado, seco cálido, semiseco semicálido, semiseco templado y templado subhúmedo. Se caracteriza por ser

Figura 2. Área de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

bosque de encino, bosque de encino-pino, bosque de mezquite, bosque de pino, bosque de pino-encino, matorral desértico micrófilo, matorral desértico rosetófilo, matorral desértico submontano, mezquital xerófilo y pastizal. Esta vegetación se encuentra con mayor nivel de verdor dentro de los meses húmedos del año entre agosto y octubre.

De manera específica, los municipios de Ciudad Fernández y Rioverde concentran su población económicamente activa en los sectores primario y terciario, con una amplia actividad agrícola de carácter citrícola, la cual se encuentra distribuida dentro de predios ejidales, en su mayoría privados, comunales y coloniales. Estos municipios cuentan con fuentes de emisión fijas como son: ladrilleras, fábricas y minas.

En el análisis espacio-temporal de los contaminantes dióxido de azufre (SO_2) y dióxido de nitrógeno (NO_2) con datos del sensor Tropomi, se obtuvo que los meses con mayor cantidad de emisiones de SO_2 del año 2020 fueron marzo, octubre y diciembre; mientras que en el caso del NO_2 fueron los meses julio y diciembre. Este primer diagnóstico de

la zona de estudio, permitió obtener un panorama general del lugar previo al trabajo de campo.

En una primera fase se llevó a cabo la exploración de la zona de manera aleatoria, independientemente de las condiciones de la tenencia de la tierra en la sierra. Esto permitió explorar nodos de contaminación atmosférica baja y alta, para hacer comparaciones entre ellos.

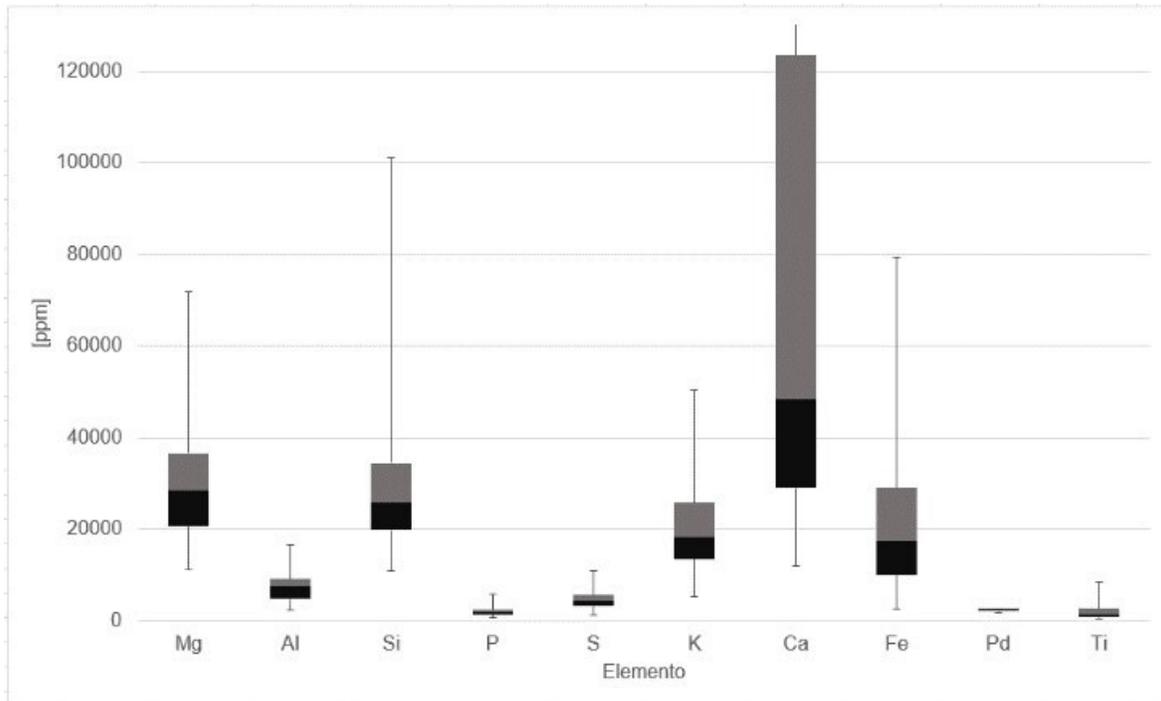
Del trabajo realizado por técnicos en campo se obtuvieron un total de 120 registros por persona, los cuales constaban de 18 variables. Estos datos se juntaron con los cuestionarios tomados por los técnicos académicos del Laboratorio Nacional de Geoprociamiento de Información Fitosanitaria (LaNGIF), dando como total 388 registros para la Sierra de Álvarez. De ellos, 138 líquenes eran de crecimiento crustáceo, 211 de talo foliáceo y 39 fruticulosos, y fueron identificados 369 en árbol y 19 en rocas.

De los puntos explorados, los registros se hicieron casi en su totalidad en géneros de especies de árboles de encinos, pinos y mezquites, donde 40% fueron mezquites, 14% encinos, 18% pinos, 6% cedros y 22% pertenecían a otros géneros. Dentro de la segunda fase se llevó a cabo el muestreo, los líquenes muestreados fueron de biotipos foliáceos y fruticulosos. De manera general, los biotipos fruticulosos muestreados pertenecían a especies de pinos, mientras que los líquenes foliáceos pertenecían a especies de encinos y mezquites.

Los resultados del análisis elemental por fluorescencia de rayos X en las muestras de líquenes se muestran en las figuras 3 y 4. En la figura 3 se observan los elementos que presentaron las mayores concentraciones: magnesio (Mg), aluminio (Al), silicio (Si), fósforo (P), azufre (S), potasio (K), calcio (Ca), fierro (Fe), paladio (Pd) y titanio (Ti).

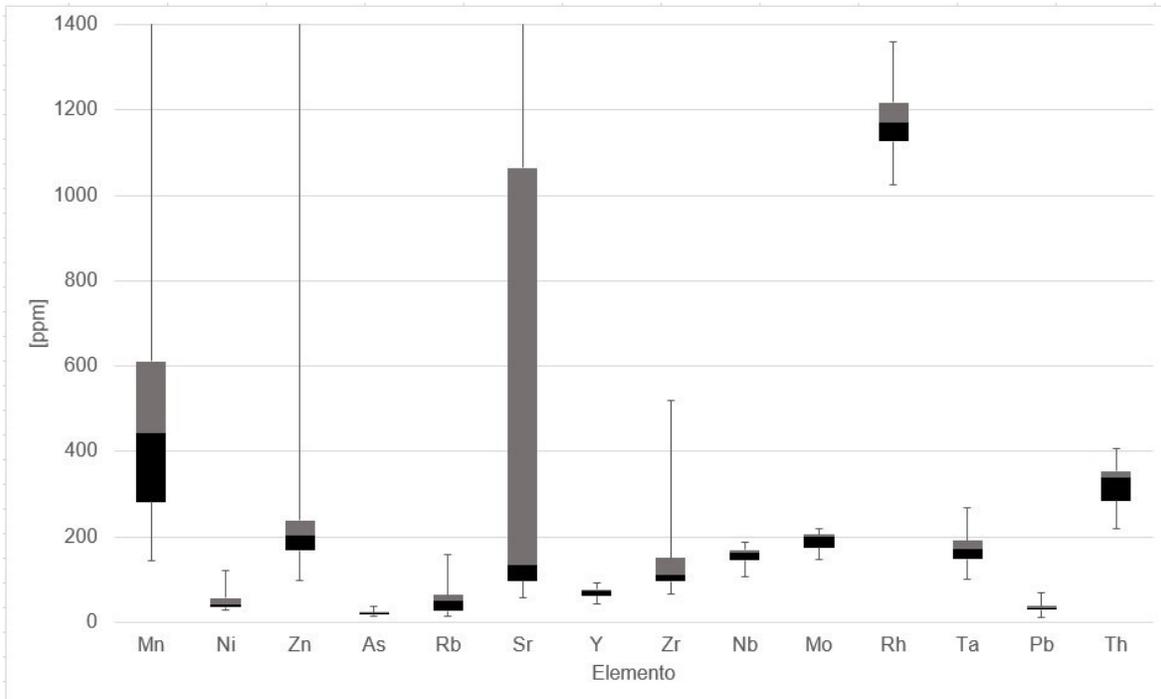
En la figura 4 se observan los elementos que presentaron las menores concentraciones: manganeso (Mn), níquel (Ni), zinc (Zn), arsénico (As), rubidio (Rb), estroncio (Sr), itrio (Y), zirconio (Zr), niobio (Nb), molibdeno (Mo), rodio (Rh), talio (Ta), plomo (Pb) y torio (Th). Sin embargo, dos de los elementos presentes en menor medida sobrepasan los límites máximos permisibles, estos fueron el arsénico y el talio (los límites máximos permisibles para los metales pesados se muestran en la tabla 1.)

Figura 3. Elementos con mayores concentraciones en las muestras de líquenes.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4. Elementos con menores concentraciones en las muestras de líquenes.



Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Límites máximos permisibles para metales pesados.

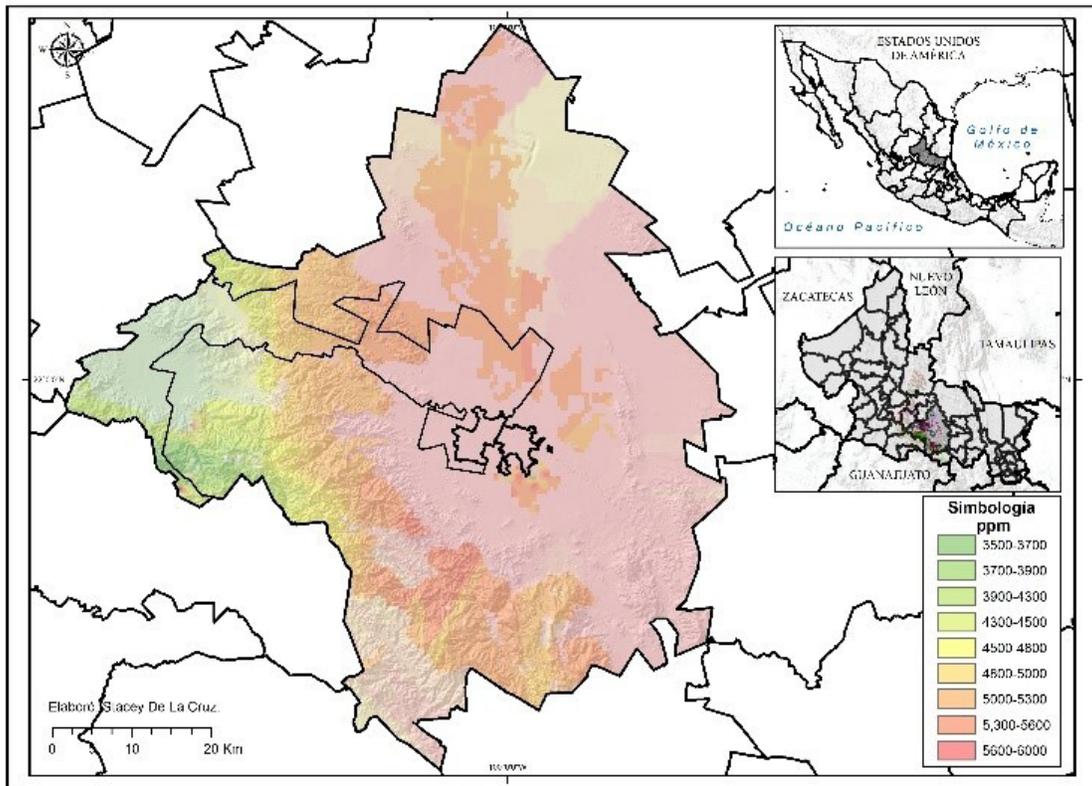
| Contaminante | US-EPA (mg/kg o ppm) | NOM-147-SEMARNAT (mg/kg o ppm) |
|-------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Arsénico | 0.4 | 22 |
| Bario | 5500 | 5400 |
| Berilio | 0.1 | 150 |
| Cadmio | 78 | 37 |
| Cromo hexavalente | 390 | 280 |
| Mercurio | n/a | 23 |
| Níquel | 1600 | 1600 |
| Plata | 390 | 390 |
| Plomo | 400 | 400 |
| Selenio | 390 | 390 |
| Talio | n/a | 5.2 |
| Vanadio | 550 | 78 |
| Zinc | 23000 | n/a |

Fuente: Elaboración propia.

El coeficiente de correlación Rho de Spearman de los valores de las muestras de líquenes de azufre y de los modelos de SO₂ fue de $\rho=0.5$, lo que quiere decir que existe una correlación entre ambas variables, aunque esta es moderada y una variable influye sólo 25% en la otra. Posteriormente, se realizó la interpolación de lo obtenido con el método kriging, que es un procedimiento geoestadístico que genera una superficie estimada a partir de los valores de un conjunto de puntos dispersos, lo cual dio como resultado la figura 5.

En la figura se aprecia que los lugares con mayores cantidades de azufre en la Sierra de Álvarez son los más cercanos a Ciudad Fernández y Río Verde. Es importante mencionar que, este elemento no es el único que se encontró en mayor medida dentro de la proximidad con las cabeceras municipales de estos municipios, sino que la mayoría de los elementos estimados tuvieron tal comportamiento. La mayoría de los elementos presentes provienen del uso excesivo de plaguicidas y fertilizantes en la zona, lo cual amerita investigaciones posteriores más precisas en la materia.

Figura 5. Concentraciones de azufre en Sierra de Álvarez.



Fuente: Elaboración propia.

REFLEXIÓN FINAL

En la actualidad, el monitoreo de la calidad del aire en México se ha desarrollado a partir de un marco de gestión que incluye dependencias gubernamentales, leyes, reglamentos, planes, programas y normas en materia ambiental; sin embargo, a pesar de la estructura institucional existente y de la red con la que se cuenta actualmente, el costo económico del monitoreo es muy alto, ello debido a la importante inversión que requiere la instalación y mantenimiento de las estaciones. Quizá por lo anterior, el país solo cuenta con 162 estaciones que registran la concentración de contaminantes atmosféricos y no todas ellas reportan datos, de tal forma que los inventarios estatales y municipales de la calidad del aire son limitados e imprecisos y están incompletos.

Este es el caso del estado de San Luis Potosí, donde solo existen cuatro estaciones de monitoreo, las cuales se ubican dentro de la zona metropolitana, por lo que se entiende que se carece de conocimiento sobre la contaminación presente en el resto de la entidad

y, por lo tanto, del impacto ambiental o transferencia de contaminantes de una zona hacia otra, como sucede con las actividades industrial y agrícola del área urbana y rural, respectivamente.

En este sentido, una fuente alternativa de información puede ser el uso de líquenes como bioindicadores de la calidad ambiental y, como se mostró en este documento, de la calidad del aire. Si bien, el tema ha sido escasamente estudiado en México, se ha comprobado su utilidad para generar conocimiento sobre las concentraciones de ciertos contaminantes en zonas donde no existen estaciones de monitoreo y que son impactadas por los niveles altos de emisiones de las zonas urbanas próximas y de las actividades agrícolas.

De esta misma manera, las imágenes de satélite y los sistemas de información geográfica son instrumentos y herramientas que facilitan la generación de análisis detallados de las condiciones ambientales en los lugares y de sus cambios en el tiempo, lo que no se limita a la contaminación del aire. Estas geotecnologías pueden ser utilizadas con la finalidad de generar información constante y cada vez más precisa que sirva de insumo a la evaluación de riesgo, la evaluación de impacto ambiental y la ordenación del territorio.

REFERENCIAS

- Ander-Egg, E. (1990). *Repensando la Investigación-Acción-Participativa. Comentarios, críticas y sugerencias*. Bilbao, España: Administración de la Comunidad Autónoma de Euskadi.
- Mostacedo, B. y Fredericksen, T. S. (2000). *Manual de métodos básicos de muestro y análisis en ecología vegetal*. Santa Cruz, Bolivia: BOLFOR. <http://www.bio-nica.info/biblioteca/mostacedo2000ecologiavegetal.pdf>
- Celli, G. (1992). Bio-indicators in the monitoring of environmental pollution. *Aerobiologia*, 8 (1), 115–121. <https://doi.org/10.1007/BF02291338>
- Denison, W. y Carpenter, M. (1973). *A guide to Air Quality monitoring with Lichens*. Corvallis, Oregon: Lichen Tecnology, Inc. <http://gis.nacse.org/lichenair/doc/Denison.pdf>
- European Spatial Agency (ESA). (2017). *Sentinel-5P muestra la contaminación del aire*. https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Spain/Sentinel-5P_muestra_la_contaminacion_del_aire

- European Spatial Agency (ESA). (2021). *Sentinel-5P. Global air monitoring for Copernicus*.
https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P
- Gonzalez, C. y Vallarino, A. (2014). Los Bioindicadores ¿una alternativa real para la protección del medio ambiente? En C. A. González, A. Vallarino, J. Pérez y A. Low (eds.), *Bioindicadores guardianes de nuestro futuro ambiental* (pp. 21-37). San Cristobal de las Casas, Chiapas: El Colegio de la Frontera Sur.
- González, D. (2014). Bioindicadores como aliados en el monitoreo de condiciones ambientales. *Cegesti*, (252), 1-4. http://www.cegesti.org/exitoempresarial/publicaciones/publicacion_252_240214_es.pdf
- Gutiérrez-Ginés, M. y Ranz, L. (2010). Utilización de un equipo portátil de fluorescencia de rayos X para el estudio de metales pesados en suelos: puesta a punto y aplicación a vertederos. En C. Bartolomé (coord.), *Estudio multidisciplinar de vertederos sellados* (pp.109-120). Madrid, España: Universidad de Alcalá. <http://digital.csic.es/bitstream/10261/73106/1/VRTEDEROS2010109190.pdf>
- Guzmán-Dávalos, L. y Álvarez, I. (2014). Hongos y líquenes como bioindicadores y microrremediación. En C. González, A. Vallarino, J. Pérez y A. Low, (eds.), *Bioindicadores guardianes de nuestro futuro ambiental* (pp. 579-604). San Cristobal de las Casas, Chiapas: El Colegio de la Frontera Sur.
- Hawksworth, D., Iturriaga, T. y Crespo, A. (2005). Líquenes como bioindicadores inmediatos de contaminación y cambios medio-ambientales en los trópicos. *Revista Iberoamericana de Micología*, 22 (2), 71–82. [https://doi.org/10.1016/S1130-1406\(05\)70013-9](https://doi.org/10.1016/S1130-1406(05)70013-9)
- Heink, U. y Kowarik, I. (2010). What are indicators? On the definition of indicators in ecology and environmental planning. *Ecological Indicators*, 10 (3), 584–593. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2009.09.009>
- Herrera-Campos, M. A., Lücking, R., Pérez-Pérez, R. E., Miranda-González, R., Sánchez, N., Barcenás-Peña, A.; Carrizosa, A., Zambrano, A., Ryan, B.D. y Nash, T. H. (2014). Biodiversidad de líquenes en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85 (1), 82–99. <https://doi.org/10.7550/rmb.37003>
- Marsh, W. y Grossa, J. (2002). *Environmental geography: Science, land use, and earth systems*. Nueva York, EUA.: Wiley.

Purvis, W. (2000). *Lichens*. Londres, Inglaterra: Natural History Museum.

Riquelme, F. S. (2008). *Evaluación del uso de líquenes como indicadores biológicos de contaminación atmosférica en la Quebrada de la plata, región metropolitana* (Tesis de licenciatura). Universidad de Chile, Santiago de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/105136>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2007). *Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio*. Diario Oficial de la Federación, 2 de marzo de 2007.

Servicio de Sanidad Forestal y Equilibrios Ecológicos (SSF), (s.f.). Parte VII, Inventario de líquenes epífitos. En *Manual Red de Nivel II. Red de parcelas permanentes para el seguimiento intensivo y continuo de los ecosistemas forestales. Métodos y criterios para homogeneizar la evaluación, toma de muestras, seguimiento y análisis de los efectos de la contaminación atmosférica y otros factores de decaimiento sobre los bosques* (pp.188-196). España: Centro de Estudios Ambientales del Mediterráneo. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/parte_7_liquenes_tcm30-155205.pdf

MONITOREO DE LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA DE LA CIUDAD DE SAN LUIS POTOSÍ MEDIANTE IMÁGENES DE SATÉLITE

Geovanni Saldierna Salas y María Guadalupe Galindo Mendoza*

INTRODUCCIÓN

La contaminación del aire representa una de las mayores amenazas ambientales para la población en el mundo. Los gases y partículas suspendidas emitidas por fuentes fijas y móviles “pueden degradarse en la atmósfera, deponerse en tierra” (afectando ciudades, actividades agropecuarias, bosques y ecosistemas naturales) “o en los océanos e integrarse en los ciclos biogeoquímicos, sus emisiones crecientes han sido la causa de algunos de los problemas ambientales más importantes que enfrentamos en la actualidad.” (Semarnat, 2016, p.259).

Los contaminantes del aire se clasifican en diferentes grupos: el dióxido de nitrógeno (NO_2), dióxido de azufre (SO_2) y partículas suspendidas ($\text{PM}_{2.5}$), por ejemplo, forman parte de los contaminantes criterio. Estos son producidos principalmente por la quema de combustibles fósiles, la actividad industrial, los automóviles y las centrales generadoras de electricidad, por lo que pueden fungir como indicadores de la calidad de aire dentro de las ciudades; de este modo su vigilancia es de suma importancia (Semarnat, 2016).

* Laboratorio Nacional de Geoprocusamiento de Información Fitosanitaria, Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Actualmente, existen diferentes maneras de observar, cuantificar y monitorear la contaminación atmosférica, algunas de ellas toman como fuente de información las imágenes provenientes de satélites que miden las concentraciones y emisiones de gases y/o partículas, a nivel mundial y, en estudios más precisos, a nivel urbano. Adicionalmente, existen instituciones encargadas del monitoreo puntual de los principales contaminantes atmosféricos a través de estaciones de monitoreo en tierra, ubicadas en zonas metropolitanas. En la práctica, la permanencia de la red de estaciones de monitoreo enfrenta el problema de los altos costos de adquisición y mantenimiento, por lo que el uso imágenes de satélite, resulta una alternativa accesible y eficaz para medir la calidad del aire.

El presente estudio tuvo como objetivo monitorear los contaminantes NO₂, SO₂ y las PM_{2.5} en la ciudad de San Luis Potosí para el período 2018-2020, mediante el uso de imágenes del satélite Sentinel-5P, así como su validación a partir de su comparación con los datos provistos por las 4 estaciones de monitoreo ubicadas en la ciudad (Biblioteca, DIF, Escuela Primaria 1° de Mayo e Industriales Potosinos Asociados) que forman parte del Sistema de Monitoreo de Calidad del Aire (SMCA) que alimenta al Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (Sinaica, 2020).

MÉTODO

Desde hace varios años, las nuevas geotecnologías, mediante el uso de imágenes de satélites y sistemas de información geográfica (SIG), comenzaron a revolucionar la forma en que se llevan a cabo los estudios sobre la contaminación atmosférica a nivel mundial (Soleimany, Grubliauskas y Šerevičienė, 2021). La calidad de los datos ha experimentado cambios importantes, por ejemplo, en un principio la resolución espacial y temporal permitió realizar diagnósticos a gran escala; pero, fue hasta el año 2017 cuando el Satélite Sentinel 5-P, a través del sensor de Monitoreo Troposférico (Tropomi, por sus siglas en inglés), comenzó a proporcionar diariamente datos mundiales de contaminantes basados en niveles de concentración atmosférica (ESA, 2019), con la ventaja de contar con una alta resolución espacial y temporal, lo que permite realizar diagnósticos en períodos continuos y a una escala urbana sobre las concentraciones de los diferentes compuestos e identificar las fuentes con mayores emisiones.

Para el monitoreo de la calidad del aire en tierra, en México existen alrededor de 241 estaciones distribuidas en un total de 102 ciudades y zonas metropolitanas (INECC, 2020), de las cuales un porcentaje mayor a 85% reportan datos para la mayoría de los

contaminantes criterio (EPA, 2016) de manera diaria y puntual desde hace 10 años, a este sistema de monitoreo se le conoce como Sinaica.

De acuerdo con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, 2020), monitorear la calidad del aire permite evaluar el cumplimiento con las normas oficiales mexicanas, cuantificar los niveles de exposición de la población a la contaminación, evaluar el estado de calidad del aire con respecto a la concentración de contaminantes criterio, alertar a la población sobre los posibles riesgos; así como generar diagnósticos, evaluaciones y estrategias para la gestión de la calidad del aire.

Área de estudio

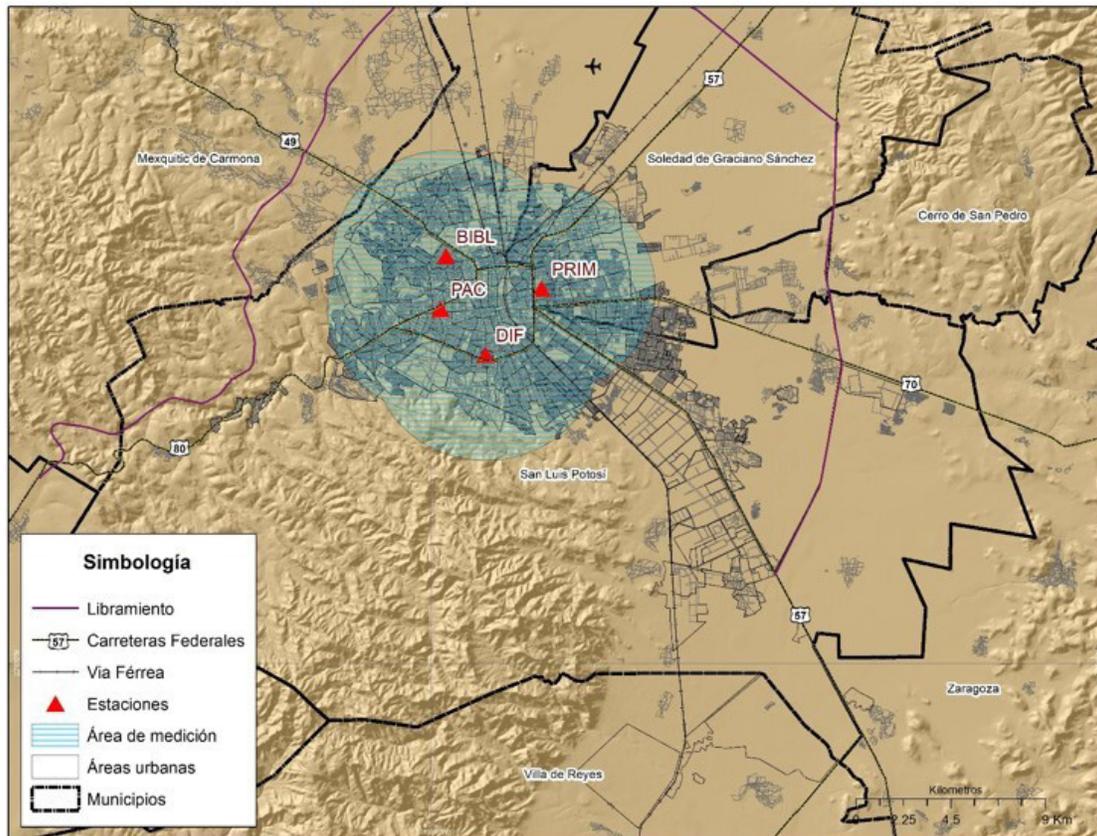
De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi, 2020), la ciudad de San Luis Potosí presentó en el año 2020 una población de 911, 908 habitantes. La ciudad se localiza en la región centro del estado homónimo y se caracteriza por la importancia que tiene la industria manufacturera como actividad económica. La carretera 57, una de las 7 carreteras federales que conecta al estado de San Luis Potosí con el norte y sur del país, tiene gran importancia para la ciudad y, en especial, para el sector industrial, debido a que conecta los parques y zonas industriales con los estados de Tamaulipas, Coahuila, Nuevo León, Guanajuato, Querétaro, Hidalgo, Estado de México y Ciudad de México (Inegi, 2018). Así, el crecimiento industrial juega un papel importante en la definición del perfil de contaminación atmosférica del lugar.

La ciudad cuenta con solo 4 estaciones de monitoreo de calidad del aire (figura 1). Las estaciones miden parámetros de variables ambientales (dirección del viento, humedad relativa, precipitación pluvial, precipitación barométrica, temperatura, velocidad del viento y radiación solar) e información puntual de diferentes gases y partículas tales como: dióxido de nitrógeno (NO₂), monóxido de carbono (CO), ozono (O₃), dióxido de azufre (SO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas PM_{2.5} y PM₁₀. El INECC aplica procedimientos de prevalidación de los datos en tiempo real que recibe el SMCA, los cuales posteriormente son validados por la Secretaría de Ecología y Gestión Ambiental en la ciudad (Segam, 2020).

Para identificar cuáles son las principales zonas, tanto urbanas como rurales, con mayores concentraciones de gases y partículas contaminantes se utilizaron las imágenes mensuales del satélite Sentinel-5P para cada uno de los contaminantes, las cuales fueron descargadas de la plataforma de Google Earth Engine para el periodo 2018-2020. Se

generaron bases de datos con la información espectral extraída de las imágenes de satélite, a partir del archivo vectorial de puntos que representa la localización de las estaciones. Además, se obtuvieron los valores del pixel durante el periodo de tiempo a analizar para comparar el comportamiento de los contaminantes en los diferentes años del período.

Figura 1. Ubicación de las estaciones de monitoreo en la ciudad de San Luis Potosí.



Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a la información proveniente de las redes de monitoreo en tierra, se obtuvieron los datos de los contaminantes para diferentes rangos de tiempo: 1 día, 1 semana, 2 semanas y 1 mes (Segam, 2020). Se realizó un promedio diario para cada estación, incluyendo sólo las estaciones que registran el contaminante en cuestión (tabla 1). Debido a que durante el día se presentan variaciones en las concentraciones de los gases y partículas, se tomaron solo los registros de una misma hora (15:00) de todos los meses.

Con el fin de identificar algún tipo de relación entre los datos obtenidos de las imágenes

de satélite y los de las estaciones de monitoreo en tierra, se calculó el coeficiente de correlación de rangos de Spearman, pues es un estadístico no paramétrico que resulta aplicable para variables medidas en escala ordinal. El coeficiente Rho de Spearman asume valores que van de -1 a 1, donde 0 indica una asociación nula, mientras que 1 y -1 significan una asociación perfecta (Díaz, García, León, Ruiz y Torres 2014; Molano y Zambrano, 2018).

Tabla 1: Estaciones de monitoreo de calidad del aire.

| Estación | Variable | Unidades estación | Unidades imagen |
|-----------------------------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| Biblioteca (BIBL) | NO ₂ | ppm | mol/m ² |
| | SO ₂ | ppm | mol/m ² |
| DIF | NO ₂ | ppm | mol/m ² |
| | SO ₂ | ppm | mol/m ² |
| | PM _{2.5} | ug/m ³ | kg/m ³ |
| Industriales Potosinos Asociados (IPAC) | NO ₂ | ppm | mol/m ² |
| | SO ₂ | ppm | mol/m ² |
| Escuela primaria 1° de Mayo (PRIM) | NO ₂ | ppm | mol/m ² |
| | SO ₂ | ppm | mol/m ² |

Fuente: Elaboración propia.

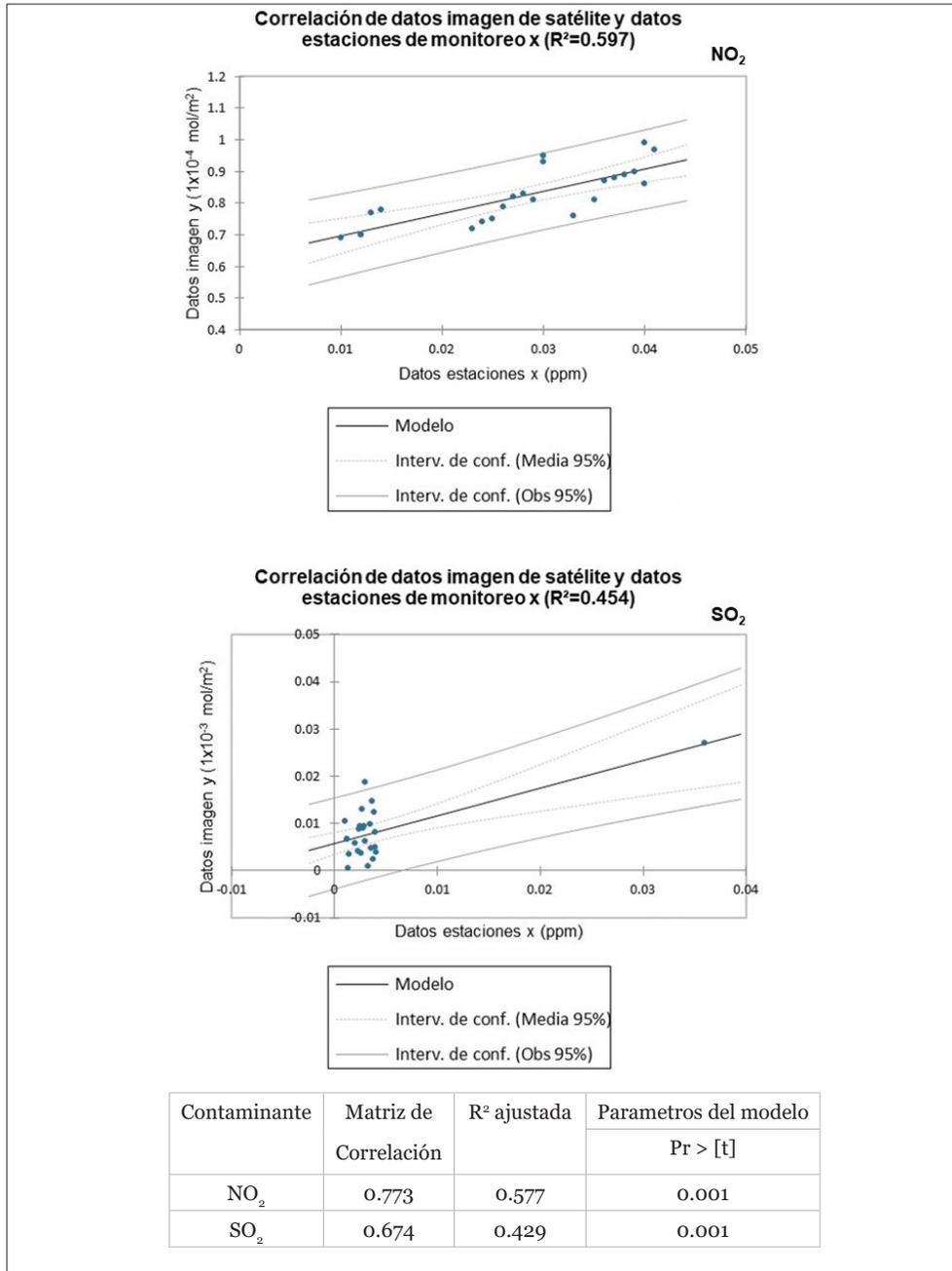
Para calcular el coeficiente Rho se utiliza la ecuación (1), donde d_i es la diferencia entre los rangos de x e y, mientras que n es el número de puntos de datos de las dos variables (Martínez, Tuya, Pérez, Cánovas, 2009).

$$r_s = 1 - \frac{6\sum d_i^2}{n(n^2 - 1)} \quad (1)$$

Para identificar el contaminante criterio que sería utilizado en el análisis, se tomó de referencia la estación DIF, ya que proporciona información de un mayor número de contaminantes y registró un valor mayor de concentración que el resto de estaciones. De los tres contaminantes analizados, el NO₂ presentó la correlación más alta (0.773) y el valor R² que indica que la variable independiente explica 57.7% de la variación de la variable dependiente, además el valor de p fue menor a 0.05 (figura 2), por lo que la asociación entre las variables es estadísticamente significativa (Molina, 2017).

En cambio, la correlación de los datos de SO_2 fue menor y la del $\text{PM}_{2.5}$ no resultó significativa. Por lo tanto, se seleccionó el NO_2 para la siguiente etapa de análisis, lo que resultó conveniente pues este contaminante es monitoreado en las cuatro estaciones urbanas.

Figura 2. Correlación de variables imágenes de satélite y estaciones de monitoreo.

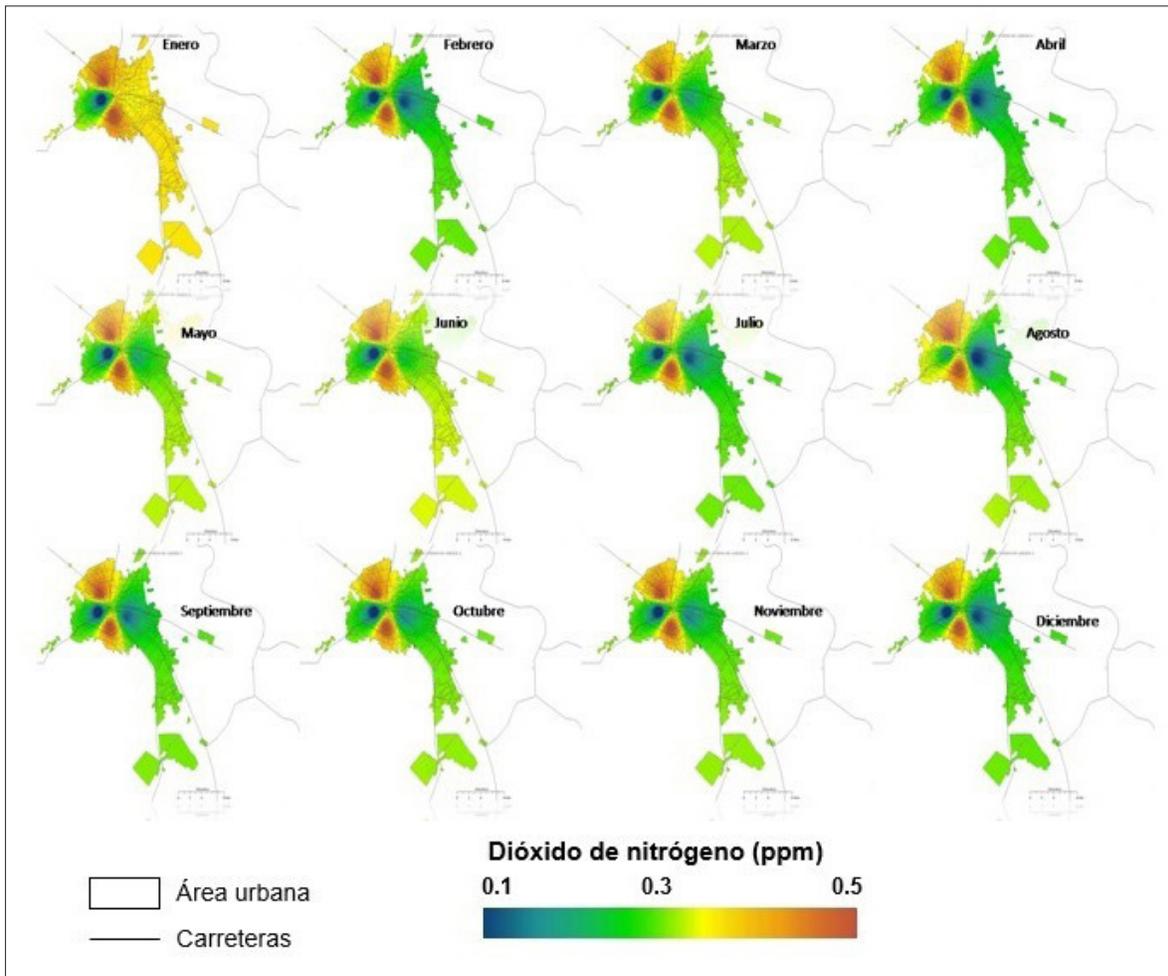


Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Para fines descriptivos de los datos, tanto del monitoreo en tierra como de las imágenes mensuales proporcionados por el satélite Sentinel-5P, se elaboraron las figuras 3 y 4, respectivamente.

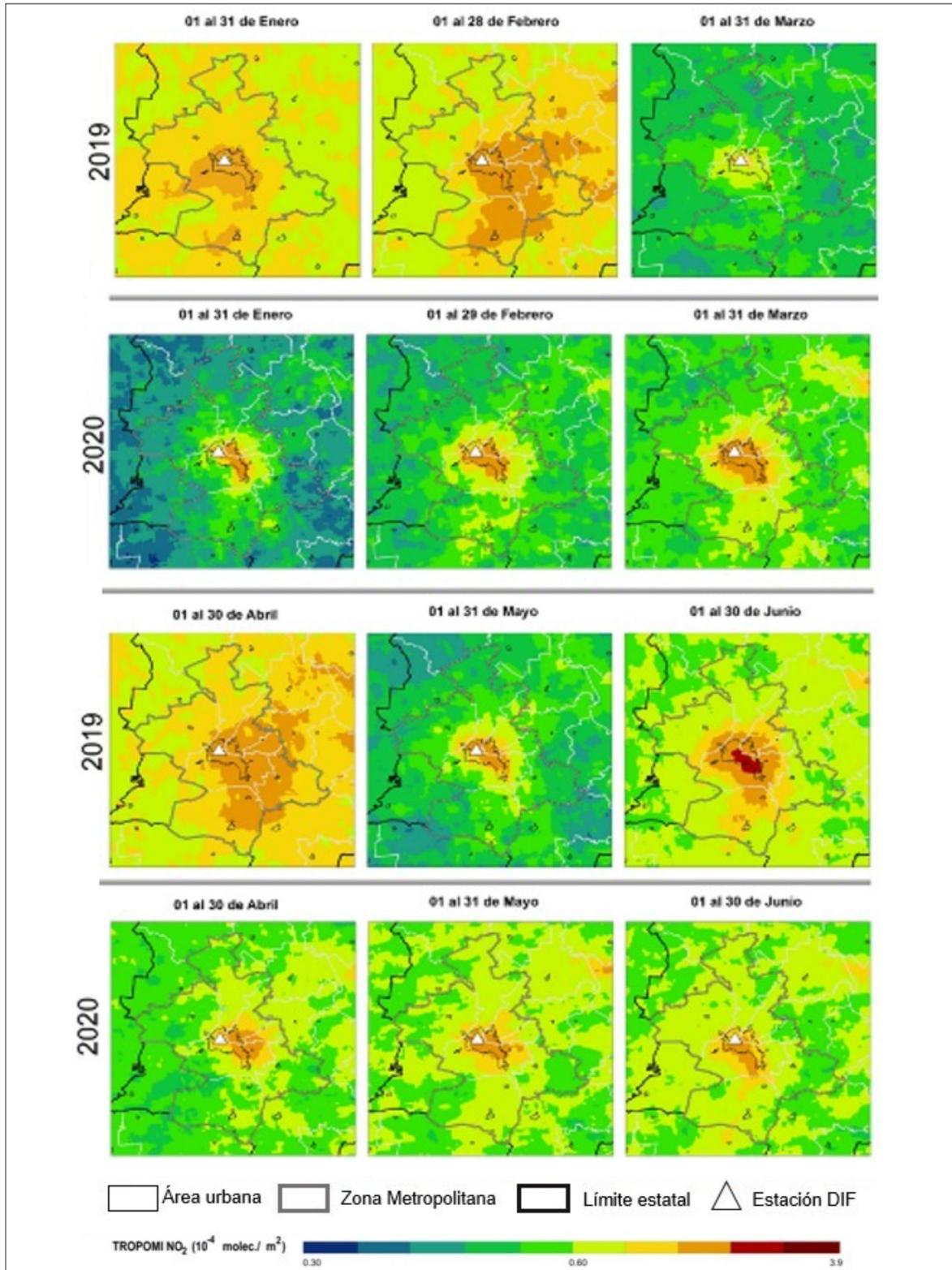
Figura 3. Concentración de NO₂ con datos de las estaciones de monitoreo de 2020.



Fuente: Elaboración propia.

En la figura 3 se muestra el resultado de la interpolación de los datos de concentración de NO₂ a partir de las estaciones de monitoreo para los meses del año 2020. En ella se observa que el mes de enero presentó el nivel más alto de concentración del contaminante, seguido de los meses de junio y mayo. Adicionalmente, destacan las estaciones DIF y Biblioteca con los registros más altos de NO₂ en la ciudad (en la gama de color del naranja al rojo). Por lo que se trata de las zonas de la ciudad donde existe un mayor nivel

Figura 4. Concentración de NO₂ con datos de las imágenes de satélite, 2019-2020.



Fuente: Elaboración propia.

de exposición de la población al dióxido de nitrógeno. En cambio, las estaciones IPAC y Escuela primaria presentan los niveles bajos de concentración del contaminante (en la gama del verde al azul).

En la figura 4 se presenta la concentración de NO_2 obtenida de las imágenes de satélite para los primeros seis meses de los años 2019 y 2020, en este caso, para la estación DIF. En ella se observa una mayor intensidad en enero, febrero y junio de 2019 que en el resto de los meses de este año y el 2020. Por su parte, el comportamiento del contaminante en los primeros seis meses de 2020 en ambas figuras (3 y 4) resulta similar, excepto el mes de enero donde las estaciones y las imágenes registran niveles altos y bajos, respectivamente.

No obstante, es importante considerar que la resolución que se obtiene a partir de las estaciones de monitoreo es baja, debido a que su medición abarca un radio de 2.5 km, por lo que no resultan convenientes para el análisis urbano de la calidad del aire, a menos que se amplíe el sistema de monitoreo y se tenga una mejor cobertura territorial. Además, no se cuenta con el registro de todos los contaminantes en las distintas estaciones urbanas, lo que limita el seguimiento de algunos de ellos. En cambio, las imágenes de satélite permiten una mejor resolución espacial y temporal del comportamiento de los distintos contaminantes, por lo que constituyen una alternativa para el análisis de la calidad del aire. No obstante, será necesario validarlas con datos tomados en tierra, pues, en este trabajo, presentaron niveles de asociación distintos y, en su mayoría, bajos.

REFLEXIONES FINALES

En la ciudad de San Luis Potosí es importante contar con un sistema de monitoreo preciso que proporcione, en tiempo y forma, información sobre la calidad del aire, con el fin de tomar las precauciones necesarias ante la presencia de alguna contingencia ambiental. Si bien, cada ciudad cuenta con diferentes fuentes de emisión, uno de los contaminantes criterio alcanza niveles alarmantes en el área urbana, tal como sucede en las ciudades más contaminadas del país (p.ej. la Ciudad de México). En otras palabras, la ciudad de San Luis Potosí se está acercando a los índices de contaminación de los que se viven en las ciudades más contaminadas del país, lo que requiere de una atención especial de las fuentes emisoras y de las medidas que eviten impactos negativos en la salud de la población.

Para poder conformar un sistema de monitoreo eficiente y suficiente se requiere de la

instalación, operación y mantenimiento de diversas estaciones de monitoreo en tierra, lo que representa una gran inversión y, por lo tanto, un gran reto. Mientras el sistema continúe funcionando como actualmente lo hace, no se contará con información adecuada para el monitoreo urbano de contaminantes criterio. En este sentido, una alternativa viable es el uso de geotecnologías, como las imágenes de satélite que, además de tener una cobertura continua del territorio, ofrecen una resolución espacial y temporal apropiada para dar seguimiento al comportamiento de la calidad del aire en las ciudades.

REFERENCIAS

- European Space Agency (ESA). (2019). *Sentinel-5P*. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-5p>
- Environmental Protection Agency (EPA). (2016). *Calidad del aire fronterizo*. Centro de Información sobre Contaminación del Aire. https://www3.epa.gov/ttnatc1/cica/airq_s.html
- Díaz, I., García, C., León, M., Ruiz, F. y Torres, F. (2014). *Guía de asociación entre variables Pearson y Spearman en SPSS*. Chile: Universidad de Chile.
- Google Earth Engine (2020). *Sentinel-5P OFFL NO2: OFFLINE Nitrogen Dioxide*. European Union,/ESA/Copernicus. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_NO2
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2020). *Informe Nacional de la calidad del aire 2019, México*. Ciudad de México: Coordinación General de Contaminación y Salud Ambiental, Dirección de Investigación de Calidad del Aire y Contaminantes Climáticos.
- Instituto nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2018). *Marco Geoestadístico*. México: Inegi. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/>
- Instituto nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2020). *San Luis Potosí*. Información por entidad, Cuéntame, Inegi. https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/slp/territorio/div_municipal.aspx?tema=me&e=24
- Martínez, R., Tuya, L., Martínez, M., Pérez, A. y Cánovas, A. (2009). El coeficiente de correlación de los rangos de spearman caracterización. *Revista Habanera de Ciencias Médicas*, 8 (2). http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1729-519X2009000200017&lng=es&tlng=es.

- Molano, L. y Zambrano, A. (2018). Análisis espacial y temporal de la concentración de NO₂ troposférico en cuatro áreas urbanas de Colombia para el periodo entre 2005 y 2016 (Tesis de licenciatura). Universidad La Salle, Colombia. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/750.
- Molina, M. (2017). ¿Qué significa realmente el valor de p?. *Pediatría Atención Primaria*, 19 (76), 377-381. <https://scielo.isciii.es/pdf/pap/v19n76/1139-7632-pap-21-76-00377.pdf>
- Secretaría de Gestión Ambiental (Segam). (2020). *Calidad del Aire en San Luis Potosí*. <http://187.188.20.178/segam/public/>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2016). *Informe de la situación del medio ambiente en México 2015. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015*. México: SEMARNAT. https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- Sistema Nacional de Información de la Calidad del Aire (Sinaica). (2020). *Red de monitoreo: San Luis Potosí*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. <https://sinaica.inecc.gob.mx/red.php?redId=79>
- Soleimany, A., Grubliauskas, R. y Šerevičienė, V. (2021). Application of satellite data and GIS services for studying air pollutants in Lithuania (case study: Kaunas city). *Air Quality, Atmosphere & Health*, 14, 411-429. <https://doi.org/10.1007/s11869-020-00946-z>

INDUSTRIA MANUFACTURERA Y EMISIONES INDIRECTAS DE CO₂ A NIVEL MUNICIPAL

Fabiola Maribel Denegri de Dios, Judith Ley García* y Carlos David Solorio Pérez**

INTRODUCCIÓN

El crecimiento económico ha sido identificado como un factor impulsor de la contaminación ambiental, especialmente de las emisiones de CO₂, destacando los países en desarrollo (Meng y cols., 2021; Clark y York, 2005) donde el avance en el uso de tecnologías limpias y procesos ambientalmente amigables aún es limitado (Samaniego, Galindo, Mostacedo, Ferre, Alatorre y Reyes, 2017).

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y los objetivos que la conforman (Objetivos de Desarrollo Sostenible u ODS), dan una importancia particular a “desvincular el crecimiento económico de un uso irracional de los recursos naturales” y a “descarbonizar” la economía para mitigar el cambio climático (ONU, 2018, p.33).

El informe publicado recientemente por el Panel intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) señala que es probable que en las próximas décadas el incremento de la temperatura media mundial alcance o supere el umbral de 1.5°C (límite establecido

* Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad Autónoma de Baja California.

** Facultad de Ciencias Humanas, Universidad Autónoma de Baja California.

en el Acuerdo de París en 2015), lo que conlleva múltiples consecuencias negativas para la sociedad y el planeta (IPCC, 2021; ONU, 2015).

El aumento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) de larga vida, particularmente el dióxido de carbono (CO_2), es considerado un componente determinante del cambio climático. Este se atribuye a actividades humanas que han generado, en un periodo corto de tiempo, niveles de GEI por encima de los registrados en la época preindustrial (Solomon y cols., 2007).

En este sentido, en los ODS se menciona; la necesidad de promover de manera sostenible: el crecimiento económico (objetivo 8); la industrialización (objetivo 9); las modalidades de consumo y producción (objetivo 12); el acceso a energía (objetivo 7); y, particularmente, en el objetivo 13 se plantea la necesidad de “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos” (ONU, 2021, s.p.).

En México, desde la década de los años cuarenta, se han implementado diversos programas para promover la actividad industrial como motor del crecimiento económico y el desarrollo del país (Monserrat y Chávez, 2003), lo que ha permitido la generación de empleo y riqueza. No obstante, este proceso se ha acompañado de contaminación ambiental, especialmente, de emisiones de GEI.

En 2018, el sector manufacturero representó 32.9% del valor agregado censal bruto, ocupando el primer lugar respecto al resto de los sectores; además, concentró 23.9% del personal ocupado y 12.1% del total de unidades económicas en el país (Inegi, 2020). No obstante, después del transporte, el sector es el segundo mayor consumidor de energía en el país (31.8%) y una tercera parte (36.1%) de su consumo es energía eléctrica (Sener, 2019). Por lo que, si bien, el sector tiene la capacidad de generar empleos y riqueza, es también un alto generador de GEI por consumo de energía.

En este documento se explora la relación entre crecimiento económico y emisiones de GEI, mediante indicadores que miden la contribución municipal del sector manufacturero a las emisiones indirectas de dióxido de carbono equivalente (CO_2e) por consumo de electricidad.

MÉTODO

Para analizar el costo ambiental en emisiones indirectas de CO_2e del sector manufacturero a nivel municipal se calcularon cuatro indicadores que consideran la intensidad de las

emisiones en función de variables económicas municipales (unidades económicas, personal ocupado, producción bruta y valor agregado censal bruto) de Inegi (2020).

En el cálculo de las emisiones indirectas de dióxido de carbono equivalente por consumo de energía eléctrica (ECO_2e) se tomó como referencia la ecuación propuesta por Semarnat (2015):

$$ECO_2e = W_{Elect} \times FE_{Elect}$$

Donde:

- ECO_2e = Emisión de bióxido de carbono equivalente proveniente del consumo de energía eléctrica (tCO_2e/MWh).
- W_{Elect} = Consumo de energía eléctrica (MWh). Dado que Inegi (2020) proporciona los consumos en millones de pesos, fue necesario convertirlos en MWh, utilizando el promedio de precios reportados por Sener (2022); es decir, 0.168 pesos por MWh.
- FE_{Elect} = Factor de emisión por consumo de energía eléctrica (tCO_2e/MWh). Se utilizó el valor proporcionado por la CRE (2019) para este factor ($0.527 tCO_2e/MWh$).

Por su parte, los cuatro indicadores de intensidad (IMUE, IMPO, IMPB e IMVA) se obtuvieron mediante la suma de emisiones (ECO_2e) de los k subsectores manufactureros en cada municipio, y su posterior división entre las unidades económicas (UE), la población ocupada (PO), la producción bruta total (PBT) y el valor agregado censal bruto (VACB), respectivamente, según las siguientes ecuaciones:

1. IMUE = Intensidad municipal por unidad económica: Emisiones de CO_2e del sector industrial por consumo de energía por unidades económicas en el municipio.

$$IMUE = \frac{\sum_{j=1}^k ECO_2e}{\sum_{j=1}^k UE}$$

2. IMPO = Intensidad municipal por personal ocupado: Emisiones de CO_2e del sector industrial por consumo de energía por personal ocupado total en el municipio.

$$IMPO = \frac{\sum_{j=1}^k ECO_2e}{\sum_{j=1}^k POT}$$

3. IMPB = Intensidad municipal por producción bruta: Emisiones de CO₂e del sector industrial por consumo de energía por producción bruta total en el municipio.

$$IMPB = \frac{\sum_{j=1}^k ECO_{2e}}{\sum_{j=1}^k PBT}$$

4. IMVA = Intensidad municipal por valor agregado: Emisiones de CO₂e del sector industrial por consumo de energía por valor agregado censal bruto en el municipio.

$$IMVA = \frac{\sum_{j=1}^k ECO_{2e}}{\sum_{j=1}^k VACB}$$

RESULTADOS

Estructura de la industria manufacturera

En las unidades económicas del sector predominan las micro empresas (94%) y en menor proporción se encuentran las pequeñas (4%) medianas (1%) y grandes empresas (1%). No obstante, en términos de emisiones, el comportamiento es inverso al tamaño y número de empresas, con 94% de las emisiones de dióxido de carbono equivalente (ECO₂e) por consumo de electricidad en las empresas grandes (77%) y medianas (16%); y solo 6% de las ECO₂e por empresas micro (3%) y pequeñas (3%).

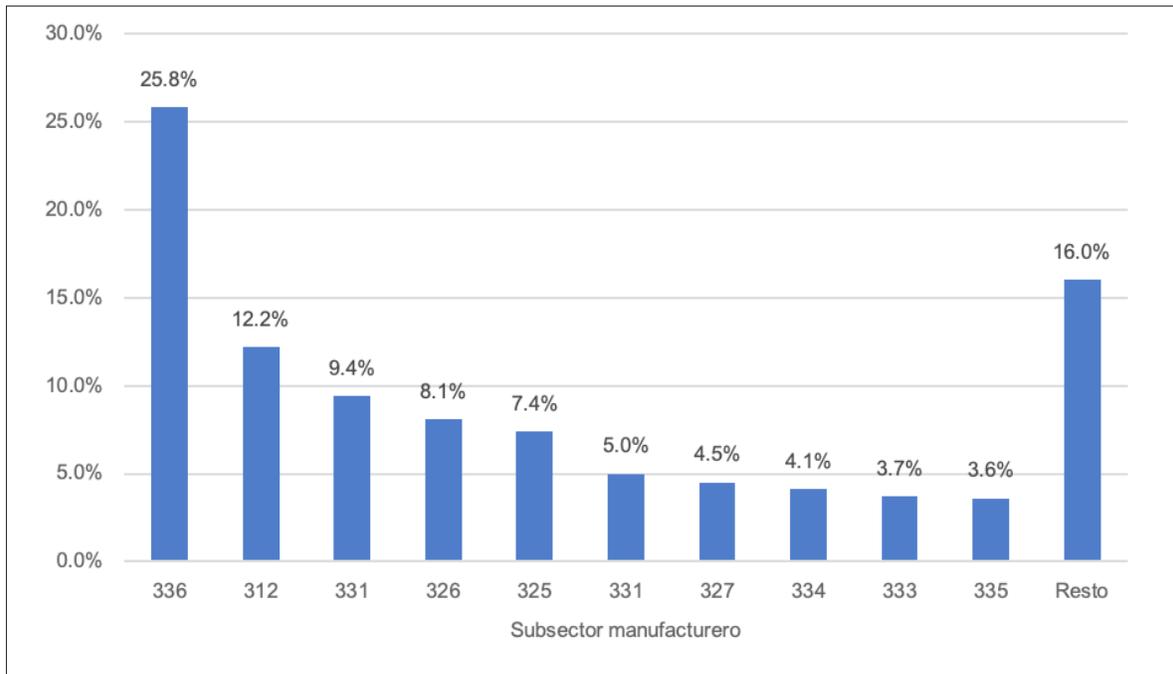
Diez subsectores manufactureros concentraron 84% del total de ECO₂e, mientras que los once restantes participaron con menos de una quinta parte (16.0%) de las emisiones (figura 1). Los subsectores con mayor contribución en las ECO₂e fueron: industria de equipo de transporte (25.8%), industria de alimentos (12.2%), industria metálica básica (9.4%), industria de plástico y hule (8.1%), e industria química (7.36%).

Con menor porcentaje participaron la fabricación de productos metálicos (5%), la fabricación de productos minerales no metálicos (4.5%), la fabricación de equipo de computación, comunicación y otros componentes o accesorios electrónicos (4.1%), maquinaria y equipo (3.7%), y accesorios, aparatos eléctricos y de energía eléctrica (3.6%).

Emisiones de CO₂e por municipio

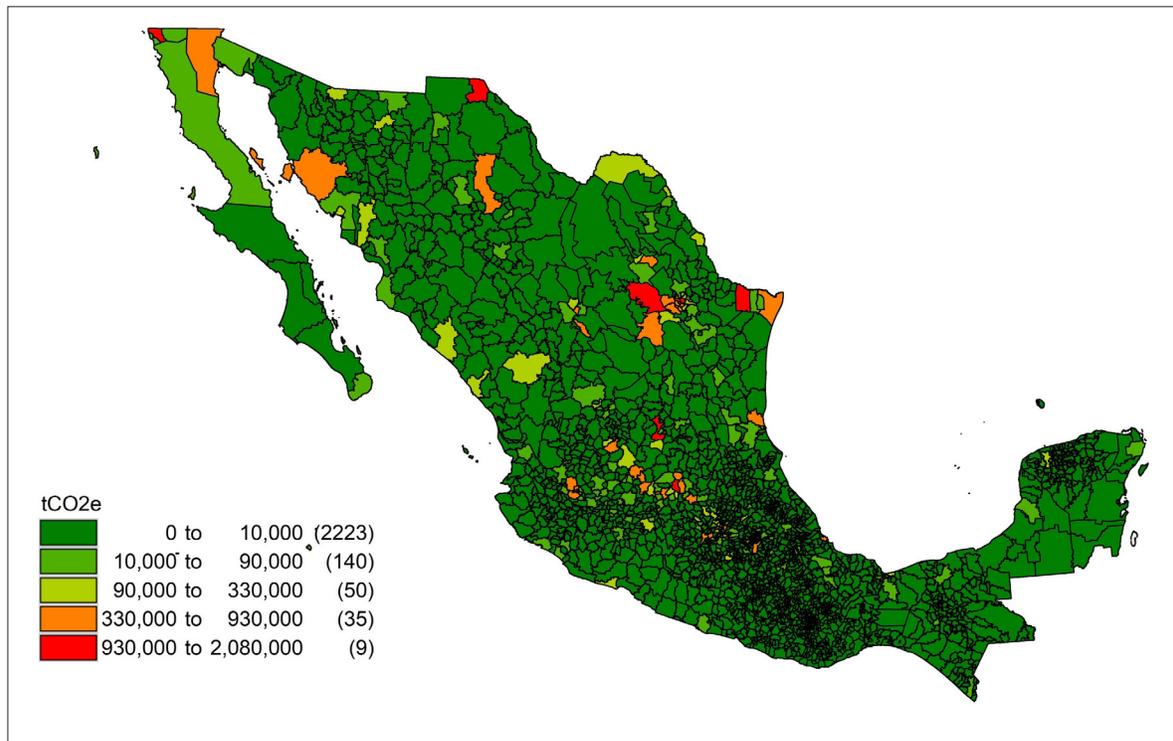
La mayoría de los municipios del país (90.5%) presentó un nivel muy bajo de ECO₂e; mientras que el resto, presentó niveles bajo (5.7%), medio (2.0%), alto (1.4%) y muy alto (0.4%). La diferencia en el volumen de emisiones entre los municipios menos emisores con respecto a los altos emisores es bastante alta (208 veces).

Figura 1. Emisiones de CO₂e por subsector.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 2. Emisiones de tCO₂e por municipio.



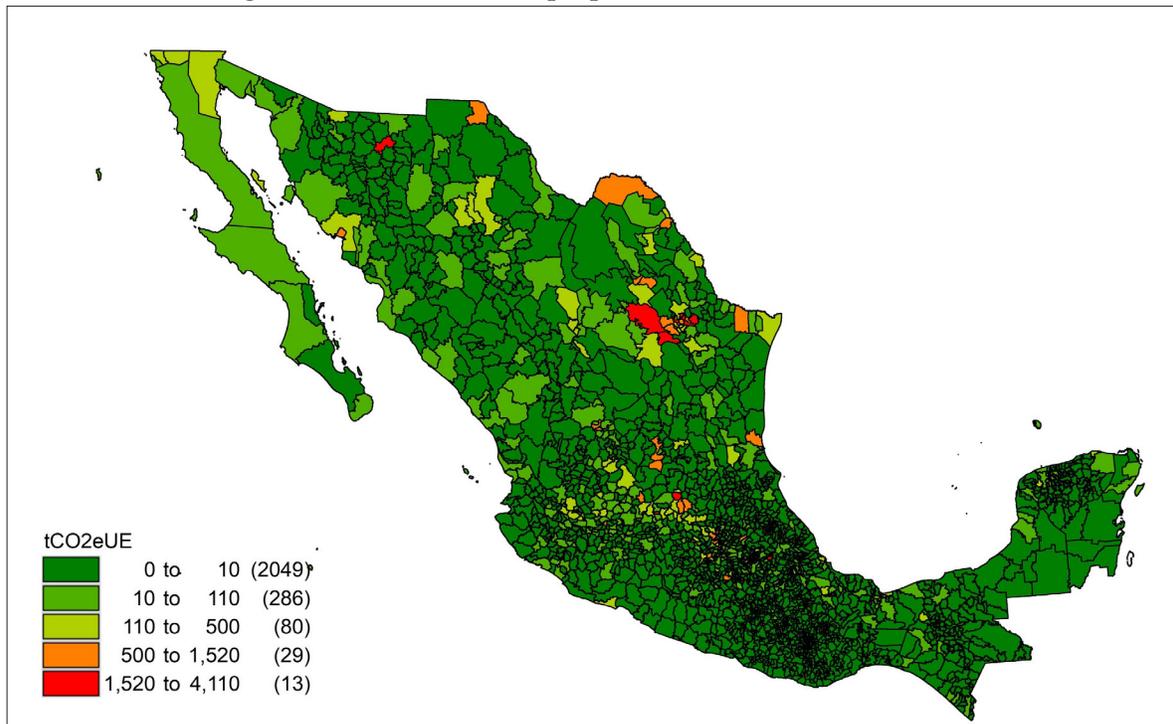
Fuente: Elaboración propia.

Los nueve municipios con muy alta generación de ECO_2e por consumo de electricidad concentran 29.6% del total de emisiones en el país, en un rango que va de 1.8% a 4.6%. La mayoría de los municipios que integran este grupo pertenecen a estados de la frontera norte de México (figura 2): Tijuana, Baja California (2.9%); Ramos Arizpe, Coahuila (3.2%); Juárez, Chihuahua (3.7%); Apodaca, Nuevo León (2.3%); San Nicolás de los Garza, Nuevo León (2.4%); General de Escobedo, Nuevo León (4.6%); el resto a la región centro occidente: San Luis Potosí, San Luis Potosí (4.0%) y Querétaro, Querétaro (2.5%). Destaca el municipio de General Escobedo en Nuevo León con el mayor porcentaje de ECO_2e en el país (4.6%) que provienen principalmente de la rama de fabricación de equipo de transporte (89.33%).

Intensidad municipal por unidad económica

Con respecto a la intensidad municipal por unidad económica (IMUE), mientras que a nivel nacional se generaron 81.48 tCO_2e por unidad económica, un grupo de 13 municipios presentaron niveles muy altos de emisiones por establecimiento, en un rango de 1,520 a 4,110 toneladas (figura 3). En este indicador destacan los municipios de la región norte y, en menor grado, de las regiones centro y centro occidente.

Figura 3. Intensidad Municipal por Unidad Económica (IMUE).



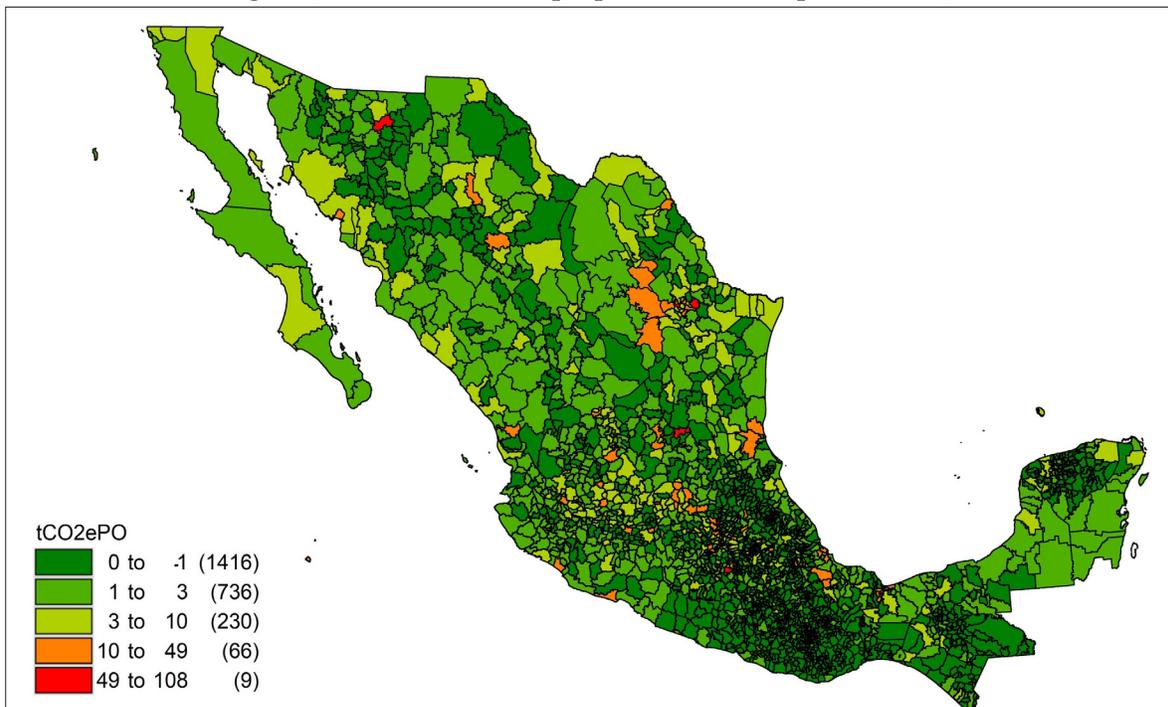
Fuente: Elaboración propia.

La IMUE más alta la obtuvieron el municipio de Nacozari de García, Sonora, donde sobresale la industria metálica básica con más del 99% de las ECO_2e ; y el municipio de Atitalaquia, Hidalgo, donde la fabricación de derivados de petróleo y del carbón concentra 99% de las emisiones municipales. Adicionalmente, cinco municipios pertenecientes a Nuevo León (Pesquería, Doctor González, General de Escobedo, San Pedro Garza García y Ciénega de Flores) pertenecen al grupo de alta intensidad de emisiones por unidad económica; así como Ramos Arizpe, Coahuila de Zaragoza; San José Chiapa, Puebla; y Villagrán, Guanajuato.

Intensidad municipal por personal ocupado

En el caso de la intensidad por personal ocupado (IMPO), a nivel nacional se presentó 7.46 tCO_2e por empleado en el sector. En la figura 4 se observa que nueve municipios se colocan en el nivel más alto, con valores de 49 a 108 toneladas por empleado. Estos se encuentran principalmente en la región centro: Atitalaquia y Atotonilco Tula en Hidalgo; Apizaco, Tlaxcala; Ayala, Morelos; en la frontera norte: Nacozari de García, Sonora; General Escobedo y Doctor González en Nuevo León; y en la región centro occidente: Villagrán y San José Iturbide en Guanajuato; y Cerritos, San Luis Potosí.

Figura 4. Intensidad Municipal por Personal Ocupado (IMPO).



Fuente: Elaboración propia.

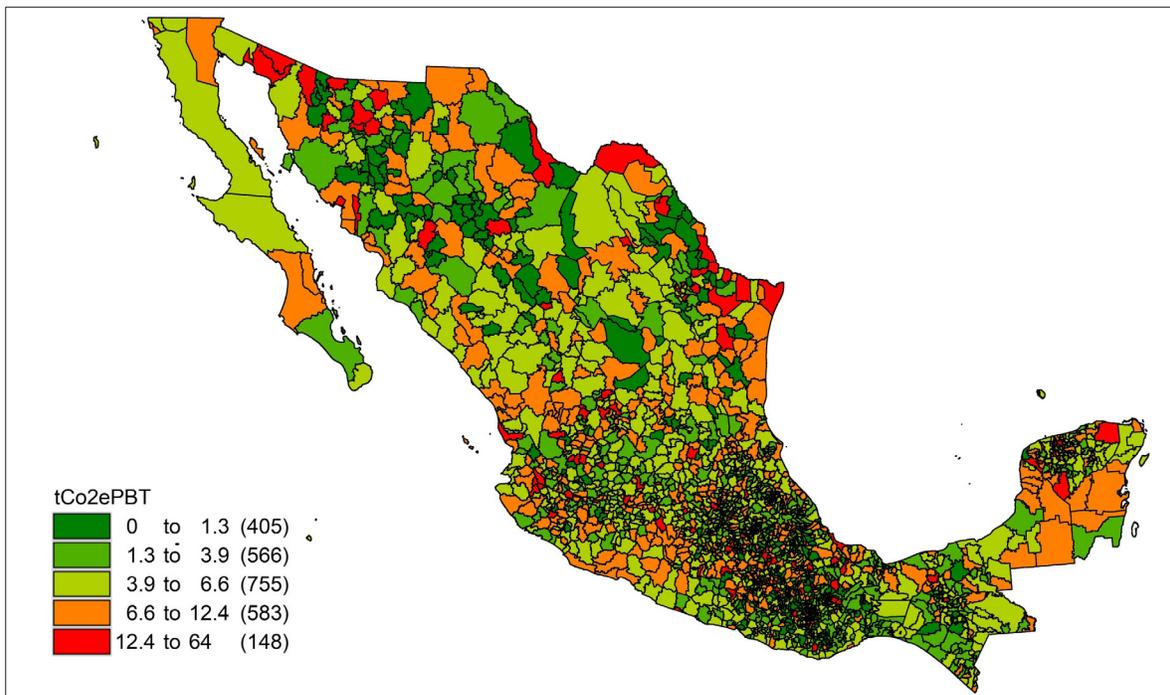
Cabe señalar que cinco municipios ocuparon los valores más altos, tanto en el IMUE como en el IMPO, por lo que se trata de aquellos donde la generación de empleo y la proliferación de empresas representan un alto costo en materia de cambio climático.

Intensidad por producción bruta e Intensidad por valor agregado

Con respecto a los niveles de intensidad por producción Bruta (IMPB) y por valor agregado (IMVA), a nivel nacional se obtuvieron 4.76 y 15.15 tCO₂e, respectivamente. Estos indicadores presentaron una distribución espacial más dispersa y heterogénea en el territorio nacional (figuras 5 y 6) que los indicadores previos (IMUE y IMPO). En el primer indicador 148 municipios se clasificaron en el nivel más alto; mientras que en el segundo lo hicieron 56.

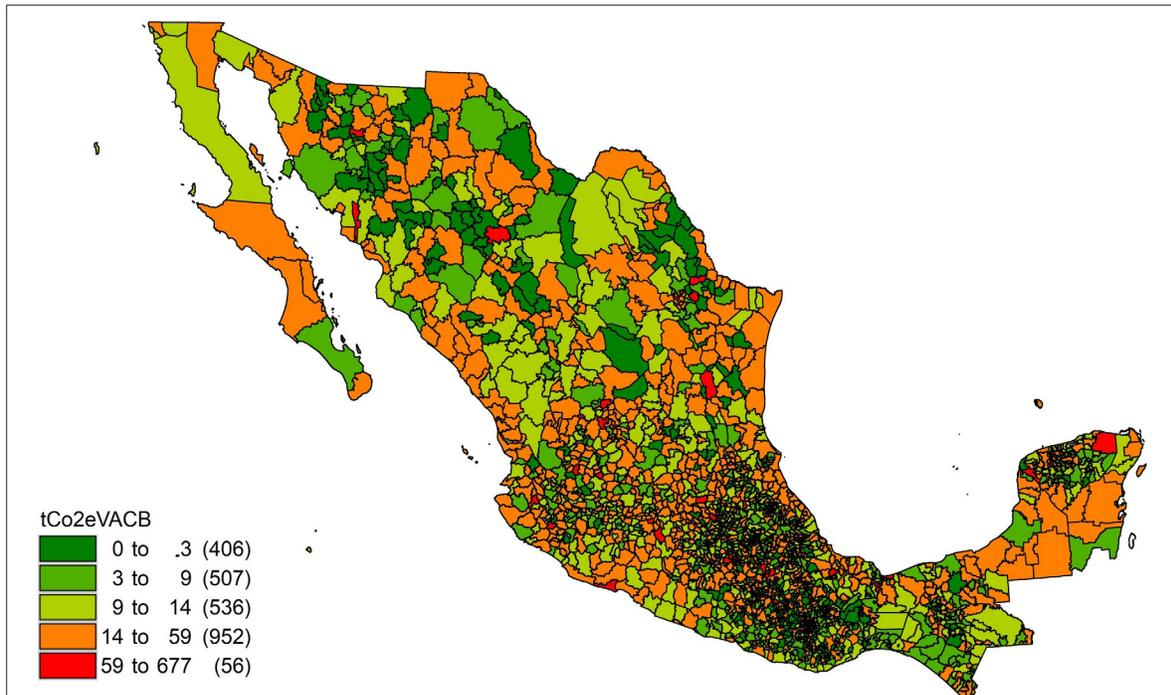
Entre los diez municipios con mayor intensidad por producción bruta total (IMPB) se encuentran San Pedro Martir, San Juan Huitepec y San Juan Quiotepec en Oaxaca; Toltepec de Guerrero y Xayacatlán de Bravo en Puebla; BÁCUM, Sonora, Valle de Zaragoza, Chihuahua; Maxcanú y Acanceh en Yucatán; y Villagrán, Guanajuato; con valores que van de 29.72 a 63.94 tCO₂e.

Figura 5. Intensidad Municipal por Producción Bruta (IMPB).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6. Intensidad Municipal por Valor Agregado (IMVA).



Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, los diez municipios con mayor intensidad por valor agregado (IMVA) presentaron valores en el rango de 155.65 a 676.55 tCO₂e. Entre ellos se encuentran municipios de todas las regiones. Del centro: San Juan Yatzona y San Miguel Tecamatlán, Oaxaca; Apizaco, Tlaxcala; Acatlán y Huichapan en Hidalgo; Tepetlaoxtoc, Estado de México; del sureste: Astacinga y Coatzacoalcos en Veracruz; del norte: Bacum, Sonora; y del centro occidente: Valle de Guadalupe, Jalisco.

Al comparar el comportamiento de los indicadores IMPB e IMVA, se identifica que el municipio BÁCUM, Sonora destaca en ambos; mientras que el municipio de Villagrán, Guanajuato, destaca en tres indicadores (UE, PO, PBT), lo que implica, en tales municipios, la generación de riqueza mediante un alto costo ambiental.

REFLEXIÓN FINAL

En este trabajo, a través de la utilización de indicadores sobre la generación e intensidad de emisiones indirectas de CO₂ e por consumo de energía eléctrica, se muestran patrones de concentración en pocos municipios, tanto en la distribución espacial como en los subsectores manufactureros.

El cálculo de emisiones por subsector manufacturero mostró que la estructura industrial está basada en empresas altamente consumidoras de energía eléctrica y, por lo tanto, emisoras de grandes cantidades de CO₂e. Dado que se trata principalmente de empresas de gran tamaño, las emisiones tienden a concentrarse en los municipios donde estas se localizan. De esta forma, los índices relacionados con las unidades económicas y la población ocupada (IMUE y IMPO) muestran niveles altos de emisión por empresa y por empleo generado en pocos municipios.

En el caso contrario se encuentran los indicadores de emisiones relacionados con la producción bruta y el valor agregado (IMPB y IMVA) de las empresas, los cuales se presentan de manera dispersa en el territorio nacional, abarcando una cantidad importante de municipios. Esto que indica que gran parte de la actividad económica en el país contribuye al cambio climático, como también, que las unidades económicas que concentran las emisiones no forzosamente generan un nivel equiparable de riqueza.

Los resultados obtenidos permiten un primer acercamiento a los impactos del sector industrial en el ambiente en términos de su contribución al cambio climático, ofreciendo elementos para la gestión municipal de emisiones de GEI. Lo anterior, mediante la promoción de planes y políticas particulares que fomenten la reducción del consumo de energía basada en carbono y el uso de energías limpias que, en conjunto, lleven a la “descarbonización” de la economía.

En otras palabras, además de la estrategia nacional en materia de cambio climático, es importante establecer lineamientos municipales que permitan atender los objetivos de desarrollo sostenible que orientan hacia el logro del crecimiento económico y el desarrollo de los países con un menor costo ambiental.

REFERENCIAS

- Clark, B. y York, R. (2005). Carbon metabolism: Global capitalism, climate change, and the biospheric rift. *Theory and Society*, 34 (4), 391–428. <https://www.jstor.org/stable/4501730>
- Comisión Reguladora de Energía (CRE) (2019). *Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/442910/Aviso_Factor_de_Emisiones_2018.pdf

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2020). *Censos Económicos 2019: Metodología*. México: Inegi. <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2019/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2021). *Climate Change 2021. The Physical Science Basis*. Cambridge, Reino Unido; Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press.
- Meng, D., Li, Y., Zheng, J., Li, Z., Ye, H. y Li, S. (2021). Decoupling Analysis of CO₂ Emissions in the Industrial Sector from Economic Growth in China. *Energies*, 14 (16), 5099. . <http://dx.doi.org/10.3390/en14165099>
- Monserrat, H. y Chávez, M. (2003). Tres modelos de política económica en México durante los últimos sesenta años. *Análisis Económico*, 18, (37), 55-80. <https://www.redalyc.org/pdf/413/41303703.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC)*. ONU, 12 de diciembre de 2015. https://unfccc.int/sites/default/files/spanish_paris_agreement.pdf
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2018). *Desafíos y estrategias para el desarrollo sostenible en América Latina y El Caribe*. Panamá: UNDG. <https://onu.org.gt/wp-content/uploads/2018/10/Desaf%C3%ADos-y-Estrategias-para-el-Desarrollo-sostenible-en-Am%C3%A9rica-Latina-y-el-Caribe-compressed.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) (2021). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- Payne, J. E. (2010). A survey of The Electricity Consumption-Growth Literature. *Applied Energy*, 87 (3), 723-731. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.06.034>
- Samaniego, J. L., Galindo, L. M., Mostacedo, S. Y., Ferre, J., Alatorre, J. E. y Reyes, O. (2017). *El cambio climático y el sector de energía en América Latina*. Santiago de Chile, Chile: CEPAL.
- Secretaría de Energía (Sener). (2019). *Balance nacional de energía 2018*. México: Sener. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/528054/Balance_Nacional_de_Energ_a_2018.pdf

Secretaría de Energía (Sener). (2022). *Precios medios de energía eléctrica por sector tarifario. Sistema de Información Energética*. <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IIIBCo2>

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat). (2015). *Acuerdo que establece las particularidades técnicas y las fórmulas para la aplicación de metodologías para el cálculo de emisiones de gases o compuestos de efecto invernadero*. Diario Oficial de la Federación, 3 de septiembre de 2015. http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5406149&fecha=03/09/2015

Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. y Miller, H. L. (2007). *Informe del Grupo de Trabajo I - Base de las Ciencias Físicas*. Cambridge, Reino Unido; Nueva York, Estados Unidos: Cambridge University Press.

VULNERABILIDAD Y POBREZA DIGITAL ANTE LA ENSEÑANZA REMOTA DE EMERGENCIA DURANTE LA PANDEMIA DE COVID-19 EN BAJA CALIFORNIA

Tracy Díaz Hernández* y Judith Ley García**

INTRODUCCIÓN

Durante el año 2020, debido a los altos niveles de contagio mundial de la enfermedad ocasionada por un nuevo coronavirus que fue detectado originalmente en China, la Organización Mundial de la Salud decidió declarar la pandemia por COVID-19 e hizo un llamamiento mundial para que los países adoptaran medidas urgentes que evitaran su acelerada propagación (OMS, 2021).

En este escenario, una de las primeras medidas del gobierno mexicano fue suspender las actividades consideradas no esenciales o evitar que se llevaran a cabo de manera presencial (Secretaría de Salud, 2020). Debido a que la educación no fue considerada esencial, el sistema educativo experimentó un cambio súbito en la forma en la que se llevaban a cabo las actividades escolares.

La Secretaría de Educación Pública, con la finalidad de preservar la salud y evitar contagios entre estudiantes, docentes y demás personal, decretó la suspensión de clases

* Doctorado en Sociedad, Espacio y Poder, Universidad Autónoma de Baja California.

** Instituto de Investigaciones Sociales, Universidad Autónoma de Baja California.

(SEP, 2020a) e implementó la Estrategia Aprende en Casa en la educación básica; mientras que la educación media superior y superior optaron por la enseñanza remota de emergencia (SEP, 2020b, 2021; Villela y Contreras, 2020).

La enseñanza remota de emergencia tiene como objetivo trasladar temporalmente los cursos presenciales a la modalidad en línea, virtual o a distancia. Es decir, “Implica el uso de soluciones de enseñanza totalmente remotas para la instrucción o la educación que de otro modo se impartirían presencialmente o como cursos combinados o híbridos y que volverán a ese formato una vez que la crisis o la emergencia hayan disminuido” (Hodges, Moore, Lockee, Trust y Bond, 2020, p.17).

La continuidad de la educación en un escenario virtual o en línea ha requerido que los estudiantes y profesores, además de poseer habilidades digitales, cuenten en sus viviendas con una infraestructura tecnológica apropiada, como son: computadora, tableta electrónica, dispositivo móvil y servicio de internet (Villela y Contreras, 2020).

Sin embargo, como señalan Velasco y cols., no todos los hogares cuentan con equipo tecnológico, con cobertura de internet o con recursos económicos suficientes para adquirirlos o rentarlos, por lo que la pandemia ha hecho evidente la brecha digital que existe en la población y que influye “tanto en la inclusión como en la inserción de los estudiantes como eje central del proceso de aprendizaje” (p.6).

Para Villela y Contreras (2021) la brecha digital incluye el acceso diferencial a bienes y servicios básicos (electricidad, teléfono, computadoras y televisión), junto con las distintas competencias necesarias para utilizarlos. Mientras que, para Coria y cols. (2011, p. 24), la pobreza digital es “la carencia de bienes y servicios basados en TIC o la falta de capacidad para aprovecharlos”.

Así mismo, Chávez y Fernández (2020) entienden la brecha digital como la diferencia que existe en el uso de las tecnologías de información y comunicación (TIC), entre los distintos estratos socioeconómicos, individuos, familias o zonas geográficas. Para los autores, la brecha digital son las desigualdades en el acceso a las tecnologías digitales y en la capacidad para hacer uso de tales herramientas.

Por otra parte, Martín (2020) menciona que el concepto de brecha digital abarca un amplio espectro de elementos, dado que no solo hace referencia a la diferencia de acceso a la conectividad de internet que tienen los individuos, sino también a la disponibilidad de recursos relacionados con las TIC, y la utilización del hardware y software.

De esta manera, se entiende que la pobreza digital tiene una relación directa con carencias en comunicación e información, que limitan las capacidades de las personas de participar en la sociedad de la información, restringiendo sus libertades de elección en los ámbitos económicos, sociales, políticos y culturales.

Si bien, en un escenario normal la pobreza digital restringe el ejercicio de ciertas libertades, en un contexto de pandemia se torna un factor clave de exclusión educativa, pues, con la transición hacia la educación remota de emergencia, impide la continuación de la formación académica de los estudiantes, incrementando el riesgo de rezago y deserción escolar.

De acuerdo con Katzman (2000, p.281), la vulnerabilidad social es la “incapacidad de una persona o de un hogar para aprovechar las oportunidades, disponibles en distintos ámbitos socioeconómicos, para mejorar su situación de bienestar e impedir su deterioro”. Dado que la pobreza digital implica que los hogares no cuentan con ciertos recursos o activos para aprovechar las oportunidades educativas, representa un componente básico de la vulnerabilidad ante la enseñanza remota de emergencia durante la pandemia.

El tema de la enseñanza remota de emergencia recobra particular importancia en entidades como Baja California, donde más de una quinta parte de la población asistía a la escuela antes de la emergencia sanitaria (Inegi, 2020) y, por tanto durante la pandemia, tuvo que adaptarse a la nueva situación o abandonar los estudios.

Según la DGPPyEE (2021), previo a la pandemia (período escolar 2019-2020) el número de estudiantes que asistía a la escuela en Baja California fue de 998, 371 y se redujo durante el año siguiente (período escolar 2020-2021) a 981,434; por lo que la entidad experimentó una disminución de la matrícula de 1.7%, ligeramente superior al 1.6% nacional y al resto de los estados fronterizos (con excepción de Tamaulipas que tuvo una pérdida de 2.2%). El resto de los estados presentó leves cambios: Sonora y Coahuila decrementos (1.2% y 0.4%); Nuevo León y Chihuahua incrementos (0.2% y 0.9%).

En este sentido, el objetivo de este trabajo es analizar la vulnerabilidad o incapacidad de los hogares de Baja California para enfrentar la enseñanza remota de emergencia durante la pandemia de COVID-19. Para ello se construyó el Índice de Pobreza Digital que incorpora un conjunto de carencias digitales presentes en las localidades del estado y permite identificar la brecha que existe entre ellas, así como las localidades vulneradas; es decir, aquellas que difícilmente pueden salir por sí solas de esta situación de fragilidad.

DESARROLLO

Para determinar el Índice de Pobreza Digital (IPD) de las localidades del estado de Baja California se tomó como base la propuesta de UIT (2021) y las siguientes carencias digitales reportadas por Coria y cols. (2011):

- CD1. Porcentaje de viviendas que carecen de electricidad
- CD2. Porcentaje de viviendas que carecen de radio
- CD3. Porcentaje de viviendas que carecen de televisión
- CD4. Porcentaje de viviendas que carecen de computadora
- CD5. Porcentaje de viviendas que carecen de teléfono
- CD6. Porcentaje de viviendas que carecen de celular
- CD7. Porcentaje de viviendas que carecen de internet

Las carencias digitales se calcularon a partir de los datos del Censo de Población y Vivienda por localidad de Inegi (2020) y se clasificaron en una escala ordinal del 1 al 5 conforme a lo especificado en la tabla 1.

Tabla 1. Nivel de carencia digital.

| Porcentaje | Valor | Nivel |
|------------|-------|---------------|
| 0-20 | 1 | Muy bajo (MB) |
| 20-40 | 2 | Bajo (B) |
| 40-60 | 3 | Medio (M) |
| 60-80 | 4 | Alto (A) |
| 80-100 | 5 | Muy alto (MA) |

Fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, se realizó el cálculo para obtener el índice de pobreza digital, mediante el promedio simple de las siete carencias digitales, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$IPD = (CD_1 + CD_2 + CD_3 + CD_4 + CD_5 + CD_6 + CD_7) / 7$$

RESULTADOS

De las 5,560 localidades de Baja California (Inegi, 2020), para el cálculo del IPD se tomaron en cuenta solo las que contaban con datos suficientes (1786 localidades). Estas últimas se distribuyen en los 5 municipios del estado de la siguiente manera: 28% en Ensenada, 36% en Mexicali, 7% en Playas de Rosarito, 11% en San Quintín, 9% en Tecate y 9% en Tijuana.

En la tabla 2 se puede observar que, en el estado, más de la mitad de las localidades (58%) tiene un nivel medio de pobreza digital y menos de una décima parte (9%) presenta pobreza alta o muy alta. De las carencias digitales destaca la falta de algunos recursos tecnológicos como lo son: el teléfono o CD_5 (en 90% de las localidades), el equipo de cómputo o CD_4 (en 75% de las localidades) y la conectividad a internet o CD_7 (en 66% de las localidades), siendo estos dos últimos sumamente importantes para la enseñanza remota de emergencia.

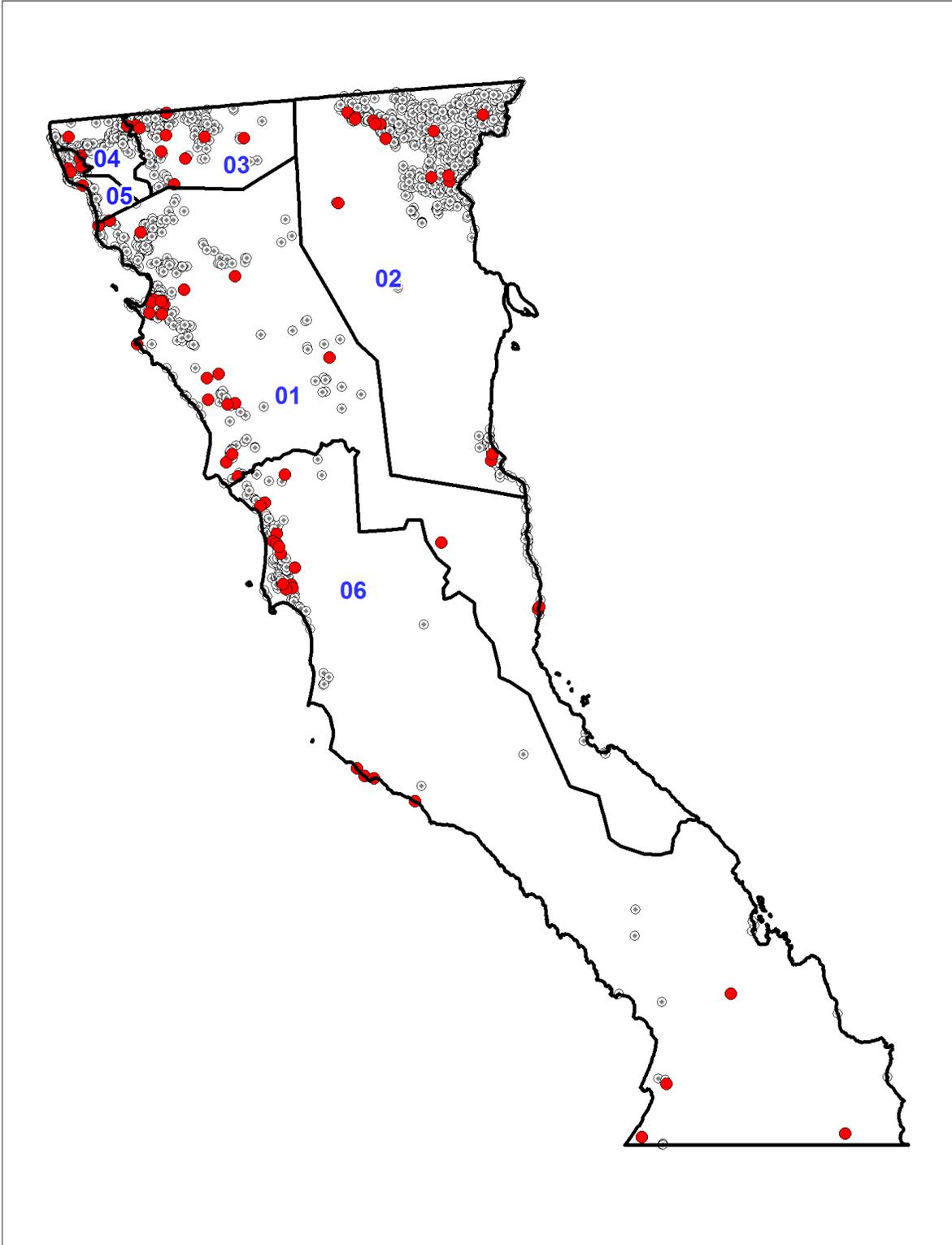
Tabla 2. Niveles de carencias digitales en Baja California.

| Indicador | MA+A | M | B+MB |
|-----------|------|-----|------|
| CD_1 | 5% | 3% | 92% |
| CD_2 | 22% | 26% | 52% |
| CD_3 | 8% | 5% | 87% |
| CD_4 | 75% | 15% | 10% |
| CD_5 | 90% | 5% | 6% |
| CD_6 | 3% | 2% | 95% |
| CD_7 | 66% | 12% | 21% |
| IPD | 9% | 58% | 32% |

Fuente: Elaboración propia.

La figura 1 muestra la distribución espacial de las localidades de Baja California, presentando en color rojo aquellas donde la pobreza digital es alta o muy alta y en color gris el resto de ellas. En la figura se puede apreciar que los niveles más altos de carencia digital se encuentran en las localidades no urbanas ubicadas en la zona fronteriza y en la costa del estado de Baja California, en los municipios de Ensenada y Mexicali. No obstante, la carencia de recursos tecnológicos se presenta espacialmente de forma heterogénea en los cinco municipios (01 Ensenada, 02 Mexicali, 03 Tecate, 04 Tijuana, 05 Playas de Rosarito, 06 San Quintín).

Figura 1 Distribución de las localidades con pobreza digital alta y muy alta.



Fuente: Elaboración propia

De las 501 localidades del municipio de Ensenada (tabla 3), 89% carece de teléfono (CD₅), 69% de computadora (CD₄) y 65% de internet (CD₇). Además, 53% de ellas presenta un nivel medio y 13% un nivel alto o muy alto de pobreza digital.

Tabla 3. IPD en las localidades de Ensenada.

| Indicador | MA+A | M | B+MB |
|-----------------|------|-----|------|
| CD ₁ | 7% | 4% | 89% |
| CD ₂ | 27% | 19% | 54% |
| CD ₃ | 9% | 8% | 84% |
| CD ₄ | 69% | 18% | 13% |
| CD ₅ | 89% | 5% | 6% |
| CD ₆ | 2% | 3% | 95% |
| CD ₇ | 65% | 11% | 24% |
| IPD | 13% | 53% | 35% |

Fuente: Elaboración propia.

En el municipio de Mexicali (tabla 4), la mayor carencia digital que se presenta en las viviendas es la falta de recursos tecnológicos como son: teléfono o CD₅ (96% de las localidades), computadora o CD₄ (82% de las localidades), e internet o CD₇ (76% de las localidades), donde 70% de las localidades se ubica en un nivel medio de pobreza digital, 12% más que el porcentaje estatal.

Tabla 4. IPD en las localidades de Mexicali.

| Indicador | MA+A | M | B+MB |
|-----------------|------|-----|------|
| CD ₁ | 2% | 0% | 97% |
| CD ₂ | 18% | 31% | 51% |
| CD ₃ | 3% | 2% | 95% |
| CD ₄ | 82% | 13% | 5% |
| CD ₅ | 96% | 3% | 2% |
| CD ₆ | 3% | 1% | 96% |
| CD ₇ | 76% | 10% | 14% |
| IPD | 4% | 70% | 26% |

Fuente: Elaboración propia.

De las 126 localidades del municipio de Rosarito (tabla 5), 58% se ubica en un nivel bajo o muy bajo de pobreza digital. La mayor carencia digital que se presenta en las viviendas es la falta de recursos tecnológicos como: teléfono o CD₅ (74% de las localidades), computadora o CD₄ (60% de las localidades), e internet o CD₇ (42% de las localidades).

Tabla 5. IPD en las localidades de Rosarito.

| Indicador | MA+A | M | B+MB |
|-----------------|------|-----|------|
| CD ₁ | 3% | 2% | 94% |
| CD ₂ | 13% | 25% | 63% |
| CD ₃ | 4% | 6% | 90% |
| CD ₄ | 60% | 21% | 19% |
| CD ₅ | 74% | 13% | 13% |
| CD ₆ | 2% | 2% | 95% |
| CD ₇ | 42% | 17% | 41% |
| IPD | 6% | 37% | 58% |

Fuente: Elaboración propia.

De las 191 localidades con que cuenta el municipio de San Quintín (tabla 6), las carencias digitales de mayor peso son las siguientes: teléfono o CD₅ (94% de las localidades), computadora o CD₄ (77% de las localidades), e internet o CD₇ (65% de las localidades).

El municipio presenta el porcentaje más alto de localidades con pobreza digital alta y muy alta (21%), ubicándose 12% arriba del porcentaje estatal. Además, 57% de las localidades tiene una pobreza digital media, por lo que al menos 78% de las localidades carece de recursos tecnológicos suficientes para la enseñanza remota de emergencia.

En las 162 localidades del municipio de Tecate, las necesidades de recursos tecnológicos más importantes son las siguientes: teléfono o CD₅ (86% de las localidades), computadora o CD₄ (78% de las localidades), e internet o CD₇ (65% de las localidades). En el municipio 59% de las localidades presenta un nivel medio de pobreza digital y 12% niveles alto y muy alto (tabla 7).

Tabla 7. IPD en las localidades de Tecate.

| Indicador | MA+A | M | B+MB |
|-----------------|------|-----|------|
| CD ₁ | 7% | 4% | 89% |
| CD ₂ | 20% | 25% | 56% |
| CD ₃ | 12% | 8% | 80% |
| CD ₄ | 78% | 12% | 9% |
| CD ₅ | 86% | 7% | 6% |
| CD ₆ | 3% | 4% | 93% |
| CD ₇ | 65% | 10% | 24% |
| IPD | 12% | 59% | 30% |

Fuente: Elaboración propia.

En el municipio de Tijuana (tabla 8), 51% de las 168 localidades presenta un nivel medio de pobreza digital y 5% niveles alto y muy alto. Las carencias digitales más importantes son la falta de recursos tecnológicos como: teléfono o CD₅ (en 81% de las localidades), computadora o CD₄ (en 77% de las localidades), e internet o CD₇ un (en 55% de las localidades).

Tabla 8. IPD en las localidades de Tijuana.

| Indicador | MA+A | M | B+MB |
|-----------------|------|-----|------|
| CD ₁ | 6% | 2% | 92% |
| CD ₂ | 8% | 21% | 70% |
| CD ₃ | 5% | 4% | 90% |
| CD ₄ | 77% | 13% | 11% |
| CD ₅ | 81% | 5% | 14% |
| CD ₆ | 1% | 0% | 99% |
| CD ₇ | 55% | 18% | 27% |
| IPD | 5% | 51% | 45% |

Fuente: Elaboración propia.

REFLEXIÓN FINAL

A partir del análisis de las carencias digitales se pudo identificar una brecha digital, como comportamiento diferenciado entre las localidades de Baja California, donde una tercera parte de ellas presenta las mejores condiciones para atender la enseñanza remota de emergencia; mientras que el resto presentan rezagos tecnológicos que constituyen una limitante en la participación de sus habitantes, tanto en la sociedad de la información como en la educación virtual. Si bien, estas privaciones existen desde antes de la pandemia, durante la enseñanza remota de emergencia se revelan como uno de los principales factores de exclusión educativa y, por lo tanto, de vulnerabilidad social.

La falta de teléfono, equipo de cómputo e internet en las viviendas es un tema medular en el estado, no sólo porque más de la mitad de las localidades carecen de ellos, sino porque son herramientas indispensables para la interacción virtual. Sin embargo, los recursos tecnológicos no pueden ser aprovechados si no existe cobertura eléctrica, como sucede en 5% de las localidades evaluadas, o bien, el acceso a la educación remota no es posible si no existe internet, aunque se cuente con computadora. Estas consideraciones son importantes para mejorar el IPD mediante el uso de ponderadores que tomen en cuenta la jerarquía y la relación que existe entre las carencias digitales.

En particular, destaca el caso de San Quintín, donde 78% de las localidades carecen de los recursos mínimos necesarios para que los estudiantes continúen con su formación académica durante la pandemia, por lo que no sólo es el municipio con mayor pobreza digital sino el más susceptible al rezago y exclusión escolar y, por ende, el más vulnerable. Adicionalmente, en este municipio, 11% de las localidades carecen de energía eléctrica, por tanto, aunque cuenten con algunos recursos digitales, no pueden aprovecharlos, menos aún combinarlos para obtener una mayor capacidad de interacción digital.

Además, es importante considerar que la falta de recursos tecnológicos también puede reflejar la escasez de otros tipos de activos y recursos en los hogares, como la falta de recurso económico que, además de impedir que estos puedan adquirir o hacerse de medios para enfrentar la enseñanza remota de emergencia, limita la satisfacción de otras necesidades apremiantes y su capacidad de aprovechar las oportunidades, haciendo más difícil su situación en general.

Por lo anteriormente expuesto, se considera que atender las carencias digitales de los hogares más vulnerables es una responsabilidad que deben asumir de manera urgente

las autoridades, no solo mediante programas de carácter educativo o pedagógico, sino a través de un abanico de programas sociales que permitan reducir la brecha digital, la pobreza digital y la vulnerabilidad de la población para lograr una mayor inclusión, tanto educativa como social.

REFERENCIAS

- Coria, S., Pérez-Meza, M. Mendoza-Cortes, E. y Martínez-Peláez, R. (2011). Brecha Digital y Pobreza Digital en el Estado de Oaxaca. *Conciencia Tecnológica*, (42), 19-25. <https://www.redalyc.org/pdf/944/94421442004.pdf>
- Chávez, M. y Fernández, J. (2020). Etnografía cuantitativa. Revitalización lingüística y difusión de las tecnologías digitales en municipios de Oaxaca, México. *Alteridades*, 30 (59), 111-121. <https://alteridades.izt.uam.mx/index.php/Alte/article/view/1132>
- Dirección General de Planeación, Programación y Estadística Educativa (DGPPyEE). (2021). *Sistema Interactivo de Consulta de Estadística Educativa*. <https://www.planeacion.sep.gob.mx/principalescifras/>
- Hodges, C., Moore, S., Lockee, B., Trust, T. y Bond, A. (2020). La diferencia entre la enseñanza remota de emergencia y el aprendizaje en línea. En P. Neira, C. Rodríguez y J. Villanueva (coords), *Enseñanza remota de emergencia a distancia: textos para la discusión* (pp.10-21). Lima, Perú: The Learning Factor.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2020). *Censo de Población y Vivienda*. México: Inegi. <https://inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Kaztman, R. (2000). Notas sobre la medición de la Vulnerabilidad Social. En *CEPAL, 5to. taller regional sobre la medición de la pobreza: Métodos y aplicaciones* (pp. 275-301). México: CEPAL. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/31545>
- Martín, A. M. (2020). La brecha digital generacional. *Revista andaluza de trabajo y bienestar social*, 151, 77-93. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7464144>
- Organización Mundial de la Salud (OMS). (2021). *Cronología de la respuesta de la OMS a la COVID-19*. <https://www.who.int/es/news/item/29-06-2020-covidtimeline>

- Secretaría de Educación Pública (SEP). (2020a). *Acuerdo número 02/03/20 por el que se suspenden las clases en las escuelas de educación preescolar, primaria, secundaria, normal y demás para la formación de maestros de educación básica del Sistema Educativo Nacional, así como aquellas de los tipos medio superior y superior dependientes de la Secretaría de Educación Pública*. Diario Oficial de la Federación, 16 de marzo de 2020.
- Secretaría de Educación Pública (SEP). (2020b). *Estrategia Nacional para el regreso seguro a las escuelas de educación básica, versión 2.0. Ciclo escolar 2020-2021*. https://educacionbasica.sep.gob.mx/multimedia/RSC/BASICA/Documento/202105/202105-RSC-LzofisOtD-Estgia_Nac.pdf
- Secretaría de Educación Pública (SEP). (2021). *Estrategia Aprende en Casa. Informe de resultados 2020-2021*. <https://www.ine.mx/wp-content/uploads/2021/09/crt-9so-2021-09-29-p2-a3.pdf>
- Secretaría de Salud (2020). *Acuerdo por el que se establecen acciones extraordinarias para atender la emergencia sanitaria generada por el virus SARS-CoV2*. Diario Oficial de la Federación, 31 de marzo de 2020. https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5590914&fecha=31/03/2020
- Unión Internacional de las Telecomunicaciones (UIT). (2021). *Nuevo índice de acceso digital*. http://www.itu.int/ITU-D/ict/dai/material/DAI_ITUNews_s.pdf
- Velasco, F., Lecaro, J., Correa, G., García, F., Mota, N., Ávila, A., y Tulcán, J. (2021). La brecha digital en el proceso de aprendizaje durante tiempos de pandemia. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, (5), 1-12. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i3.515
- Villela, F. y Contreras, D. S. (2021). La brecha digital como una nueva capa de vulnerabilidad que afecta el acceso a la educación en México. *Academia y Virtualidad*, 14 (1), 169-187. <https://doi.org/10.18359/ravi.5395>

CARTA DE RIESGO GEOLÓGICO POR AGRUPACIÓN DE ZONAS HOMOGÉNEAS DE ROCA-SUELO Y ZONAS MORFOLÓGICAS DEL CERRO DE LA SILLA, NUEVO LEÓN

Luis Eduardo Arista Cázares, José Rosbel Chapa Guerrero, Gabriel Chávez Cabello* y
Nelly Lucero Ramírez Serrato**

INTRODUCCIÓN

El Área Metropolitana de Monterrey (AMM) es uno de los mayores conglomerados urbanos de México y el principal centro de interés económico e industrial del país. Esta situación ha derivado en un crecimiento poblacional notable, provocando que los límites urbanos se trasladen más allá del valle, con el asentamiento de población en las bases de las montañas y pendientes pronunciadas e inestables (Montalvo-Arrieta, Chávez-Cabello, Velasco-Tapia y Navarro, 2010).

En su trabajo sobre movimientos en masa en el AMM, Chapa, Méndez, Chávez, Chapa e Ibarra (2016) señalan que, con la llegada de las precipitaciones intensas, se genera los siguientes dos efectos: a) La erosión rápida de la superficie del suelo, y b) El aumento rápido del nivel freático, tanto en macizos rocosos como en suelos. Esto último disminuye las fuerzas de fricción en las rocas y la saturación de suelos. Los autores argumentan que “Debido a esto y a las pendientes (taludes escarpados) en donde se construye, se

* Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León.

** Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.

han producido innumerables movimientos en masa en la región, fallas de taludes, rodamiento de grandes bloques y solifluxiones” (p.42).

De acuerdo con Alcántara y Murillo (2008) y Serrato (2019, p.3) “Una manera de gestionar el desarrollo urbano para evitar desastres, desencadenados por este tipo de fenómeno, requiere de la apropiada caracterización del sitio de manera espacio-temporal, a través de herramientas cartográficas que permitan la localización de los sitios más vulnerables”. Bajo este tenor, el propósito del presente trabajo es aplicar la metodología empleada por Chapa (1993) para la elaboración de una carta de riesgo geológico, mediante la agrupación de zonas homogéneas de roca y/o suelo, conjuntado con un mapa de zonas morfológicas.

Generalidades del área de estudio

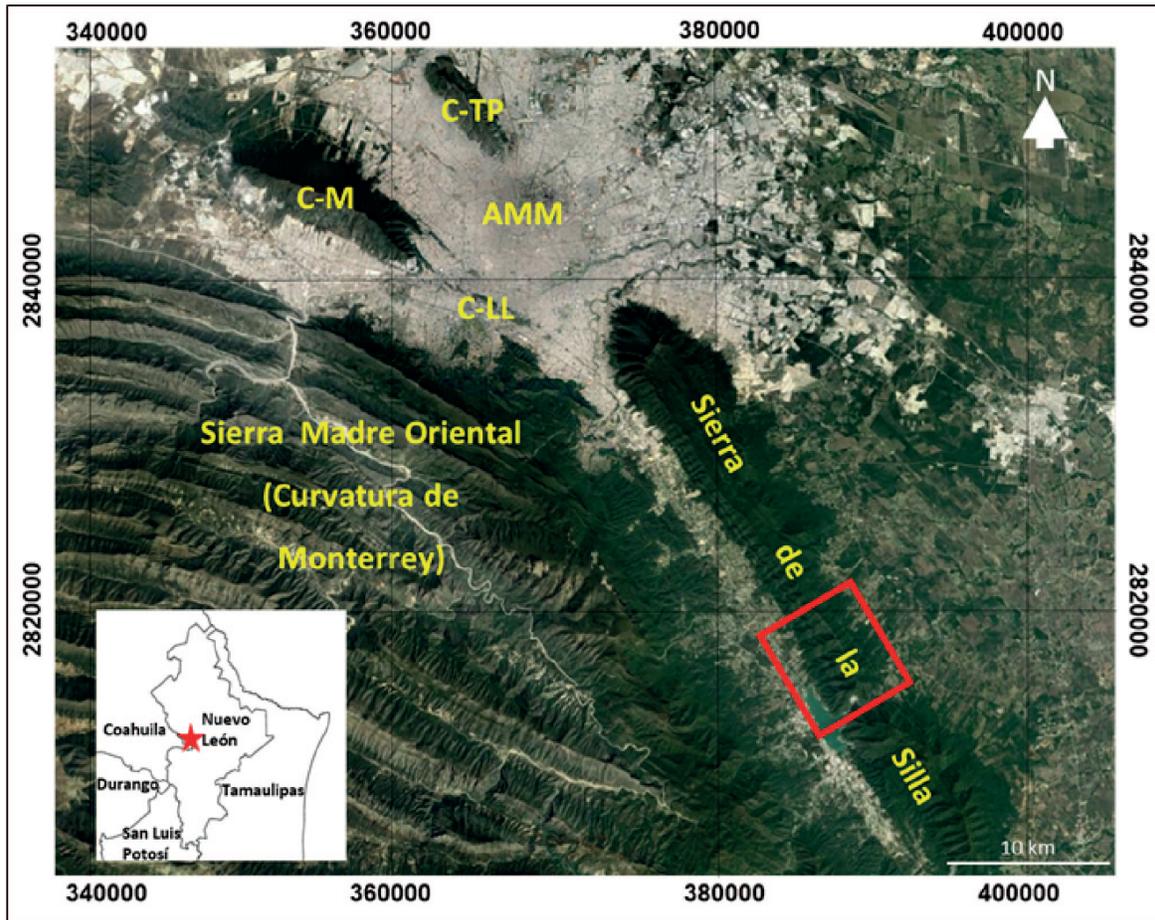
El área de estudio abarca la porción central de la Sierra del Cerro de la Silla (figura 1), en los municipios de Santiago y Cadereyta, ambos del estado de Nuevo León. Alcanza una elevación máxima de 1,151 ms.n.m., teniendo como mínima 388 ms.n.m. Con respecto a la fisiografía, el área pertenece a la provincia de la Sierra Madre Oriental, se localiza a un costado de los pliegues que conforman la Curvatura de Monterrey, dicha provincia está compuesta por un paquete de rocas sedimentarias de la era mesozoica (Eguiluz, 2017).

Padilla (1985) describe la sierra del Cerro de la Silla como un pliegue elongado con una longitud de 42 km y 5 km de ancho, tiene una estructura simétrica en sus extremos, mientras que en su parte media se encuentra recostado al noreste y con ausencia de su flanco noreste, dado por una falla inversa (cabalgadura). El pliegue presenta un rumbo de N 30° W, donde su plano axial es cercano a la vertical con un promedio de 70° al SW.

En la figura 1, sobre una imagen satelital Landsat, se presenta la localización del área de estudio (recuadro rojo) en la Sierra de la Silla, así como la ubicación, al noroeste de esta, del Área Metropolitana de Monterrey (AMM), el Cerro de las Mitras (C-M), el Cerro del Topo Chico (C-TP) y el Cerro de la Loma Larga (C-LL).

Para la zona, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2010) registra, en las estaciones meteorológicas La Boca (clave 19-069) y Santiago (clave 19-065), una temperatura media anual de 21.3°C, con una temperatura máxima de 45.5°C y -7.0°C como mínima; mientras que la precipitación total anual varía de 1,001 a 1,124 mm.

Figura 1. Ubicación del área de estudio.



Fuente: Obtenida de Google Earth Pro.

MÉTODO

La metodología empleada fue la propuesta por Chapa (1993), quien realizó un estudio geológico en el área norte de la Curvatura de Monterrey, que se conoce como Anticlinal de Los Muertos, en el municipio de San Pedro Garza García, Nuevo León. En dicho trabajo, el autor propone la elaboración de una carta de riesgos geológicos mediante la categorización de zonas homogéneas en macizo rocoso y en suelo, además de la clasificación de zonas morfológicas con base en la pendiente topográfica. La aplicación de esta metodología es válida para la región del noreste de México, dentro de la Sierra Madre Oriental (Sánchez, 2001; García, 2008; Chapa y cols., 2010; Viveros, 2019).

La carta de zonas homogéneas consiste en clasificar el área de estudio tomando en cuenta aspectos similares en la litoestratigrafía del macizo rocoso, así como el comportamiento de las discontinuidades (tabla 1).

Tabla 1. Criterios para la delimitación de las zonas homogéneas.

| Litología / suelo | | |
|-----------------------|--------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| Discontinuidades | | |
| Separación | Amplio | > 1.0 m |
| | Mediano | 0.5 – 1.0 m |
| | Reducido | 0.2 – 0.5 m |
| | Muy reducido | < 0.2 m |
| Grado de intemperismo | W5 | Suelo |
| | W4 | Completamente intemperizado |
| | W3 | Fuertemente intemperizado |
| | W2 | Medianamente intemperizado |
| | W1 | Intemperizado |
| | W0 | Sana |
| Relleno | Material Autóctono | Brecha tectónica, disolución de CaCO ₃ , material retrabajado |
| | Material alóctono | Material relavado de la superficie superior |

Fuente: Elaboración propia.

Previamente se realizó una cartografía geológica-estructural detallada en escala 1:28,000. Esto consistió en el reconocimiento geológico en campo, en donde se realizaron recorridos perpendiculares a la estratificación, para la toma de datos estructurales de rumbo y buzamiento, así como la identificación de los contactos entre las formaciones aflorantes y de los puntos de control a lo largo de ellas.

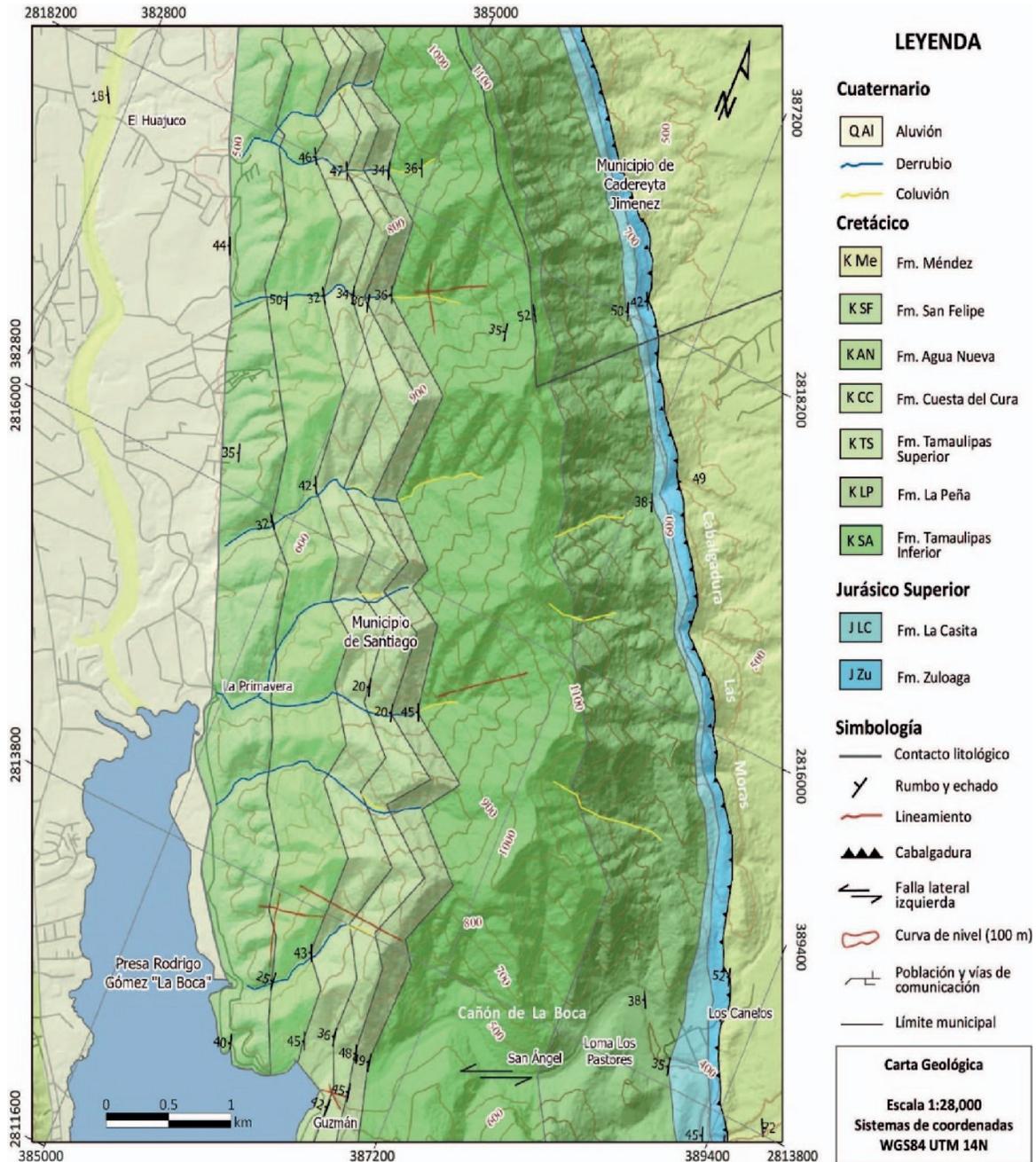
Para la carta de zonas morfológicas se tomó el criterio del grado de inclinación de la pendiente topográfica, clasificándose en tres niveles: baja (<5°), mediana (5-15°) y alta (>15°).

Para el desarrollo de dicha metodología, se emplearon modelos de sistema de información geográfica (SIG) en el programa ArcGIS Pro 2.8.0, considerando como insumos: un conjunto de modelos digitales de terreno (MDT) con resolución de 5 x 5 m (cartas G14C36B2, G14C36B4, G14C36C1 y G14C36C3), obtenido por el Inegi (2012), y las cartas topográficas con clave G14C36b y G14C36c de Inegi (2009).

RESULTADOS

Como parte del proceso implementado se obtuvieron: 1) La carta geológica-estructural, 2) La carta de zonas homogéneas y 3) La carta de zonas morfológicas.

Figura 2. Carta Geológica-Estructural.



Fuente: Elaboración propia.

Carta geológica-estructural

El levantamiento geológico-estructural en el área de estudio (figura 2), permitió identificar y cartografiar diez unidades litoestratigráficas aflorantes, cuyas edades abarcan desde el jurásico superior hasta el cretácico superior: Formación Zuloaga (Imlay, 1938), Formación La Casita (Imlay, 1936), Formación Taraises (Imlay, 1936), Formación Tamaulipas Inferior/San Ángel (Muir, 1936; Longoria y Dávila, 1976), Formación La Peña (Humphrey, 1949), Formación Tamaulipas Superior (Muir, 1936), Formación Cuesta del Cura (Imlay, 1936), Formación Agua Nueva (Stephenson, 1922), Formación San Felipe (Muir, 1936) y Formación Méndez (Jeffreys, 1910 en Palmer, 1927).

Los contactos entre las formaciones se presentan de manera concordante y transicional, teniendo una secuencia de depósitos sedimentaria de manera ininterrumpida. La orientación preferencial de los estratos marca un rumbo de 148° con 43° de buzamiento, estando marcada por fallas inversas (en su mayoría dentro de la Formación Tamaulipas Inferior) y un plegamiento hacia las rocas más jóvenes (formaciones Agua Nueva, San Felipe y Méndez), permitiendo una gama de discontinuidades perpendiculares y oblicuas a la estratificación, así como también estrías de falla identificadas en la Formación Tamaulipas Inferior, producto de una falla lateral izquierda a lo largo del Cañón La Boca.

Carta de zonas homogéneas

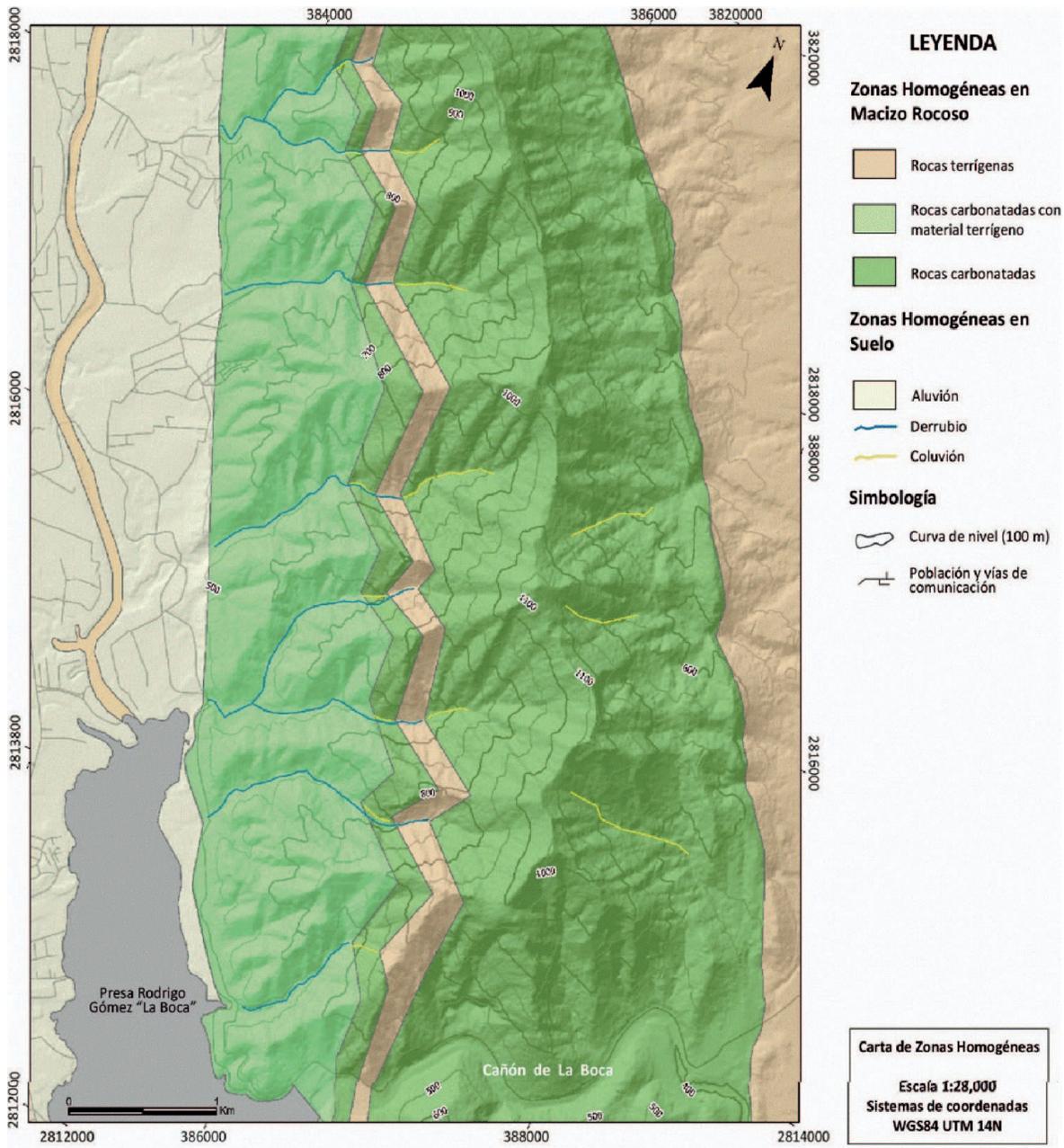
Considerando el aspecto litológico y la calidad de las discontinuidades en el macizo rocoso (tabla 1), se establecieron las siguientes tres zonas homogéneas (figura 3):

Zona 1. Rocas carbonatadas: caliza en estratos gruesos a masivos (70 – 250 cm) y superficie ondulada-rugosa; la separación en las discontinuidades va de reducida a mediana, con relleno de caliza brechada; se encuentra en un estado de intemperismo de W2 a W0. Esta zona corresponde a las formaciones Zuloaga, La Casita, Taraises, Tamaulipas Inferior y Tamaulipas Superior.

Zona 2. Rocas carbonatadas con material terrígeno: intercalaciones de caliza, caliza arcillosa y lutita en estratos medianos a gruesos (>1 a <100 cm) en una superficie planar-lisa; la distancia entre las discontinuidades va de reducida a muy reducida, presentando en ocasiones un relleno tanto de material alóctono (material no consolidado) como autóctono (calcita). El grado de intemperismo es de W1 a W3. Esta zona corresponde a las formaciones Cuesta del Cura, Agua Nueva y San Felipe.

Zona 3. Rocas terrígenas: conformada por lutita, lutita calcárea pertenecientes a las formaciones La Peña y Méndez, en estratos medianos a laminares (1 a 10 cm) en una superficie planar-rugosa; con una separación muy reducida en las discontinuidades, con un grado de intemperismo de W3 a W5, llegando a tener un relleno alóctono.

Figura 3. Carta de Zonas Homogéneas.



Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las zonas homogéneas en suelo se identificaron las siguientes: 1) Coluvión: bloques masivos (>1 m de diámetro) producto del fracturamiento de las calizas, localizados en los márgenes de los arroyos; 2) Derrubios: bloques calcáreos y arcillosos de menor tamaño (<1 m de diámetro) subangulares, localizados en los lineamientos de los arroyos, producto del desplazamiento por flujos de agua y por gravedad; 3) Aluvión: conformado por todo el material arrastrado por las corrientes de agua, cuyo tamaño y composición es heterogénea. Estas se depositan en los ríos y zonas bajas de valle.

Carta de zonas morfológicas

El modelo SIG obtenido a partir del modelo digital de terreno con resolución de 5 x 5 m de Inegi (2012), permitió clasificar el área de estudio en los tres niveles de pendiente considerados (figura 4), abarcando en su mayoría pendientes >15° en el macizo rocoso, que corroboró la zona delimitada para material coluvial en las partes de la montaña. A partir de los 700 m.s.n.m hacia cotas menores, se presentan niveles de pendiente entre 5° y 15°, abarcando los arroyos salvajes (pendientes pronunciadas; <700 ms.n.m.) y la falda de la sierra (650-500 ms.n.m). Las pendientes <5° están ubicadas en la zona del valle y en la parte baja de los arroyos (<500 m.s.n.m).

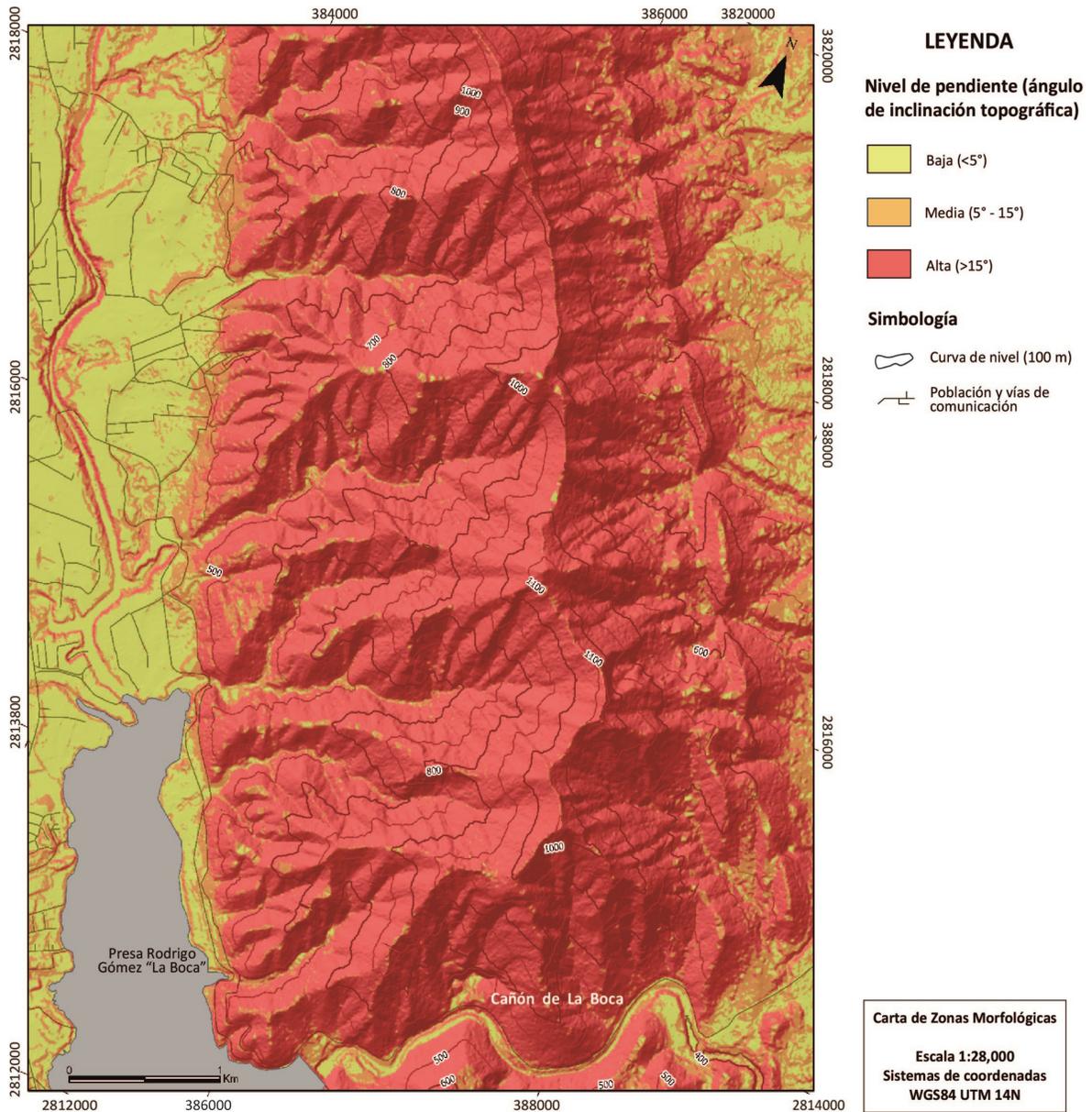
REFLEXIÓN FINAL

La conjugación de las cartas de Zonas Homogéneas y Zonas Morfológicas da como resultado la Carta de Riesgos Geológicos. Esto permite diferenciar el tipo de material homogéneo conforme a la pendiente topográfica. A partir de este estudio, se pueden realizar otros de mayor alcance, como la determinación de la resistencia del macizo rocoso y la clasificación RMR (Rock Mass Rating) propuesta por Bieniawski (1989), posteriormente realizar un análisis del mecanismo de falla para verificar la estabilidad del macizo rocoso con respecto a su orientación y la pendiente de la ladera. Si se identifica alguna inestabilidad, se procede a realizar un análisis cinemático para predecir la dirección del movimiento.

Los mapas resultantes sirven como una herramienta preliminar de gestión del territorio y son válidos como análogos para la aplicación de estudios llevados a cabo en otros sitios montañosos aledaños. Por lo que la metodología implementada es efectiva en la obtención de las zonas con posible ocurrencia a fenómenos naturales de carácter geológico, específicamente relacionados con la inestabilidad de laderas. Esta información es básica para implementar medidas de prevención de riesgos, así como en la orientación

de programas que busquen sensibilizar a la población, determinando el grado de riesgo geológico y la vulnerabilidad que pueden presentar los asentamientos humanos.

Figura 4. Carta de Zonas Morfológicas.



Fuente: Elaboración propia.

REFERENCIAS

- Alcántara, I. y Murillo, F. G. (2008). Procesos de remoción en masa en México: hacia una propuesta de elaboración de un inventario nacional. *Investigaciones Geográficas*, (66), 47-64. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n66/n66a4.pdf>
- Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering*. Nueva York, EUA.: Wiley Inc.
- Chapa, R. I., García, D. M., Lemus, O. R., Garza y L. A. (2010). *Estudio geólogo-geofísico para determinar movimientos en masa y riesgos geológicos en el Cañón del Huajuco (La Estanzuela) al sureste del Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México*. (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Chapa, J. R. (1993). *Massenbewegungen an steilhängen der Sierra Madre Oriental im grossraum Monterrey, Mexiko* (Tesis de doctorado). RWTH-Aachen University: Alemania.
- Chapa, J. R., Méndez, S., Chávez, G., Chapa, R. I. e Ibarra, S. E. (2016). Movimientos en masa, un riesgo geológico latente en el área metropolitana de Monterrey, N.L., México. , 19 (82), 41-45.
- Eguiluz, S. (2017). Exploración petrolera en el frente plegado Laramide de la Sierra Madre Oriental. *Ciencia UANL*, 20 (85), 21-26.
- Palmer, R. H. (1927). Geology of Eastern Hidalgo and adjacent parts of Veracruz, Mexico. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 11 (11), 1173-1220. <https://doi.org/10.1306/3D9327CB-16B1-11D7-8645000102C1865D>
- García, J. (2008). *Determinación de riesgos geológicos en el noreste del Cerro de las Mitras dentro del Área Metropolitana de Monterrey, Nuevo León, México* (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Humphrey, W. E. (1949). Geology of the Sierra de Los Muertos area, Mexico (with description of Aptian cephalopods from La Peña Formation). *GSA Bulletin*, 60 (1), 89-176. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1949\)60\[89:GOTSDL\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1949)60[89:GOTSDL]2.0.CO;2)
- Imlay, R. W. (1936). Geology of the Western part of the Sierra de Parras, Coahuila. *Geological Society of America Bulletin*, 47 (7), 1091-1152. <https://doi.org/10.1130/GSAB-47-1091>

- Imlay, R. W. (1938). Studies of the Mexican Geosyncline. *GSA Bulletin*, 49 (11), 1651-1694. <https://doi.org/10.1130/GSAB-49-1651>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2009). *Carta topográfica. Escala 1: 20,000*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2012). *Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LiDAR, Terreno Grid, con resolución de 5 m*. <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/>
- Montalvo-Arrieta, J. C., Chávez-Cabello, G., Velasco-Tapia, F. y Navarro, I. (2009). Causes and effects of landslides in the Monterrey Metropolitan Area, NE Mexico. En E. D. Werner y H. P. Friedman (eds.), *Landslides: causes, types and effects* (pp. 1-32). Reino Unido: Nova Science Publishers, Inc.
- Muir, J. M. (1936). *Geology of the Tampico Region Mexico*. Tulsa, Oklahoma, EUA.:The American Association of Petroleum Geologist. <https://doi.org/10.1306/SV8338>
- Longoria, J. F. y Dávila, V. M. (1979). Estratigrafía y microfacies del Cerro de la Silla, SE de Monterrey. *Boletín del departamento de Geología UNI-SON*, 2 (1), 65-95.
- Padilla, R. J. (1985). Las estructuras de la Curvatura de Monterrey, estados de Coahuila, Nuevo León, Zacatecas y San Luis Potosí. *Revista Instituto de Geología*, (6)1,1-20. <http://www.rmkg.unam.mx/index.php/rmkg/article/view/1343>
- Sánchez, E. (2001). *Riesgos geológicos en la porción noreste del Cerro de la Silla, Monterrey, N.L., México* (Tesis de Licenciatura). Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
- Serrato, N. L. (2019). *Diseño y validación de modelos de predicción espacial para cartografiar susceptibilidad por deslizamientos en la zona metropolitana de Monterrey, N.L., México* (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Nuevo León, México. <http://eprints.uanl.mx/17990/1/1080288774.pdf>
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2010). *Normales climatológicas por estado*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/informacion-climatologica-por-estado?estado=nl>
- Stephenson, L.W. (1922). Some Upper Cretaceous Shells of the Rudistic group from the Tamaulipas, Mexico. *Proceedings of United States Natural History Museum*, 61 (2422), 1-28. <https://doi.org/10.5479/si.00963801.61-2422.1>

Viveros, D. (2019). *Zonificación y detección de riesgos geológicos en el flanco sur del Cerro de las Mitras* (Tesis de maestría). Universidad Autónoma de Nuevo León, México.
<http://eprints.uanl.mx/18018/>

ZONIFICACIÓN Y EVALUACIÓN DEL PELIGRO GEOMORFOLÓGICO EN ZUMPANGO DEL RÍO, GUERRERO

Elizabeth Núñez Carachure*, Oscar Frausto Martínez** y Alma Villaseñor Franco*

INTRODUCCIÓN

En el año 2015 se celebró la Cumbre de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo Sostenible con el fin de que los líderes mundiales aprobaran la Agenda para el Desarrollo Sostenible; es decir, el documento denominado “Transformar Nuestro Mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible” que incluye los 17 Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS). Lo anterior, con la intención de poner fin a la pobreza, luchar contra la desigualdad y la injusticia, así como hacer frente al cambio climático, buscando que nadie se quede atrás para el 2030 (ONU, 2014).

Dentro de los ODS de la Organización de las Naciones Unidas se encuentra el objetivo 11: Ciudades y comunidades sostenibles, el cual busca “lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles” (ONU, 2015, p.16). De tal forma que, el logro de las diez metas que integran el ODS 11 implica la consecución de otros ODS y sus metas. La presente investigación se centra en dos de las metas propuestas (11.5 y 11.b), las cuales se reproducen textualmente a continuación (ONU, 2015, p.15):

* Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Guerrero.

** Laboratorio de observación e investigación espacial, Universidad de Quintana Roo.

De aquí a 2030, reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres, incluidos los relacionados con el agua, y de personas afectadas por ellos, y reducir considerablemente las pérdidas económicas directas provocadas por los desastres en comparación con el producto interno bruto mundial, haciendo especial hincapié en la protección de los pobres y las personas en situaciones de vulnerabilidad. (Meta 11.5).

De aquí a 2020, aumentar considerablemente el número de ciudades y asentamientos humanos que adoptan e implementan políticas y planes integrados para promover la inclusión, el uso eficiente de los recursos, la mitigación del cambio climático y la adaptación a él y la resiliencia ante los desastres, y desarrollar y poner en práctica, en consonancia con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, la gestión integral de los riesgos de desastre a todos los niveles. (Meta 11.b).

El estudio se centra en el análisis de la ciudad de Zumpango del Río, en el municipio de Eduardo Neri, del Estado de Guerrero, en México, e incluye áreas contiguas. La zona es afectada principalmente por fenómenos geológicos e hidrometeorológicos como fuertes lluvias, inundaciones, procesos de laderas que son detonados principalmente por huracanes y sismos. Los impactos de estos fenómenos naturales son principalmente a la población e infraestructuras presentes, por lo que es importante generar conocimiento acerca estos procesos para su análisis y monitoreo.

Cabe señalar que, a pesar de que el Estado de Guerrero sufre anualmente pérdidas materiales y humanas anualmente que son detonadas principalmente por fenómenos naturales, no existen atlas de riesgo que estén a una escala adecuada. De hecho, de los 81 municipios de la entidad, solo los 3 siguientes cuentan con un atlas de riesgos: Chilpancingo de los Bravo, Zihuatanejo de Azueta y Acapulco de Juárez (Gandaria, 2021); es decir, se tiene cubierta 8.48% de la superficie total del estado, lo que indica que, en general, se carece de información básica para la toma de decisiones en la mitigación de riesgos derivados de fenómenos naturales.

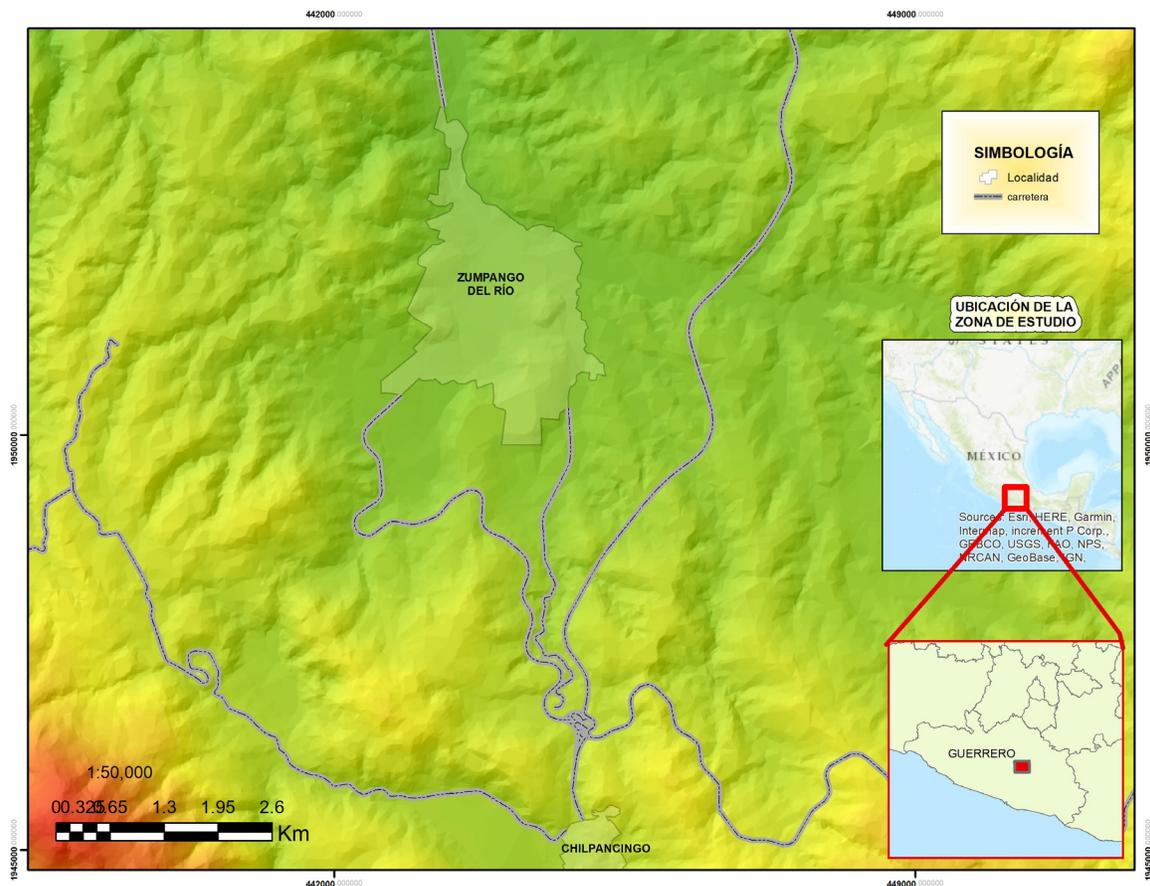
De esta manera, el objetivo de este trabajo fue realizar análisis morfológicos y morfométricos para establecer una zonificación geomorfológica, mediante el uso de herramientas geomáticas (sistemas de información geográfica), así mismo se aplicó un juicio de valor descriptivo basado en criterios de cartografía geomorfológica, junto con la clasificación tipológica, para determinar las zonas con mayor peligro. Así, la

investigación siguió las bases de la Geomorfología, la cual “tiene por objeto de estudio la parte abiótica de la Tierra y como objetivo deducir las configuraciones presentes en su superficie a lo largo del tiempo, usando un método histórico-natural” (Guerrero, 2019, p.448; Pedraza, 1996).

Zona de estudio

La localidad de Zumpango del Río es la cabecera municipal de Eduardo Neri, Guerrero, México (figura 1), se ubica al norte de Chilpancingo de los Bravo, capital del estado, y a razón de que colinda con esta, se encuentra permanentemente en una situación de presión por el crecimiento exponencial de los asentamientos urbanos.

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

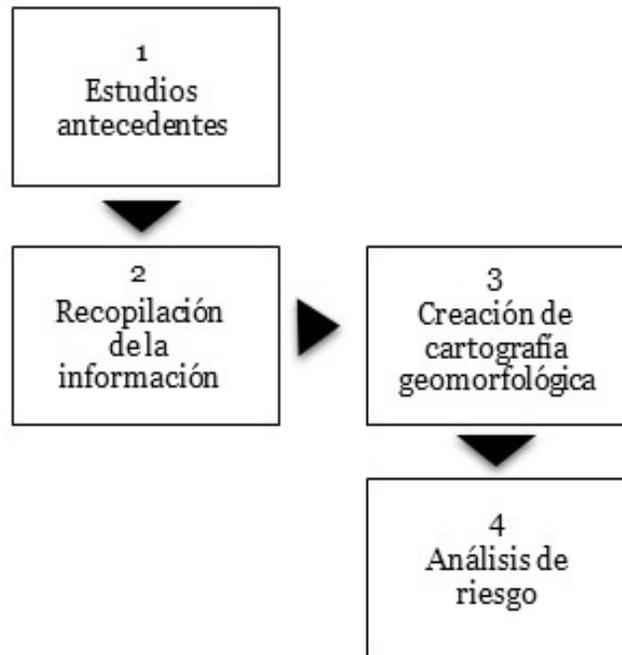


Fuente: Elaboración propia con base en Inegi (2019).

La localidad pertenece a la subcuenca del río Huajapa (RH18Bd), inicia desde la barranca Seca, como se conoce localmente, cuenta con un área de 1,299.98 kilómetros cuadrados y un perímetro de 192.77 kilómetros, es de tipo exorreica, tiene una elevación máxima

de de 2,960 msnm y una mínima de 480 msnm, la pendiente de la corriente principal es de 2.858 % y drena principalmente en la subcuenca R. Balsas- San Juan Tetelzingo. La elevación principal de Zumpango del Río es el cerro del Tepletayo y el principal drenaje es conocido como Barranca Seca. (Inegi, 2020).

Figura 2. Metodología de la investigación.



Fuente: Elaboración propia.

METODOLOGÍA

La investigación se desarrolló en las siguientes 4 etapas (figura 2):

1. Estudios antecedentes: cuyo fin fue caracterizar la zona de estudio y compilar información físico-geográfica que sirviera de fundamento explicativo (geología, clima, hidrología, entre otros). Así mismo se investigó acerca de los fenómenos naturales que se han presentado anteriormente en esta zona.
2. Recopilación de información: que consistió en la obtención de información geográfica elaborada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). Los insumos que se utilizaron son el conjunto de datos vectoriales de información topográfica de la carta E14C28 Chilpancingo a escala 1:50,000 (Inegi, 2019) y sus actualizaciones

(2013-2018), así como la revisión de artículos científicos referentes al análisis de cartografía.

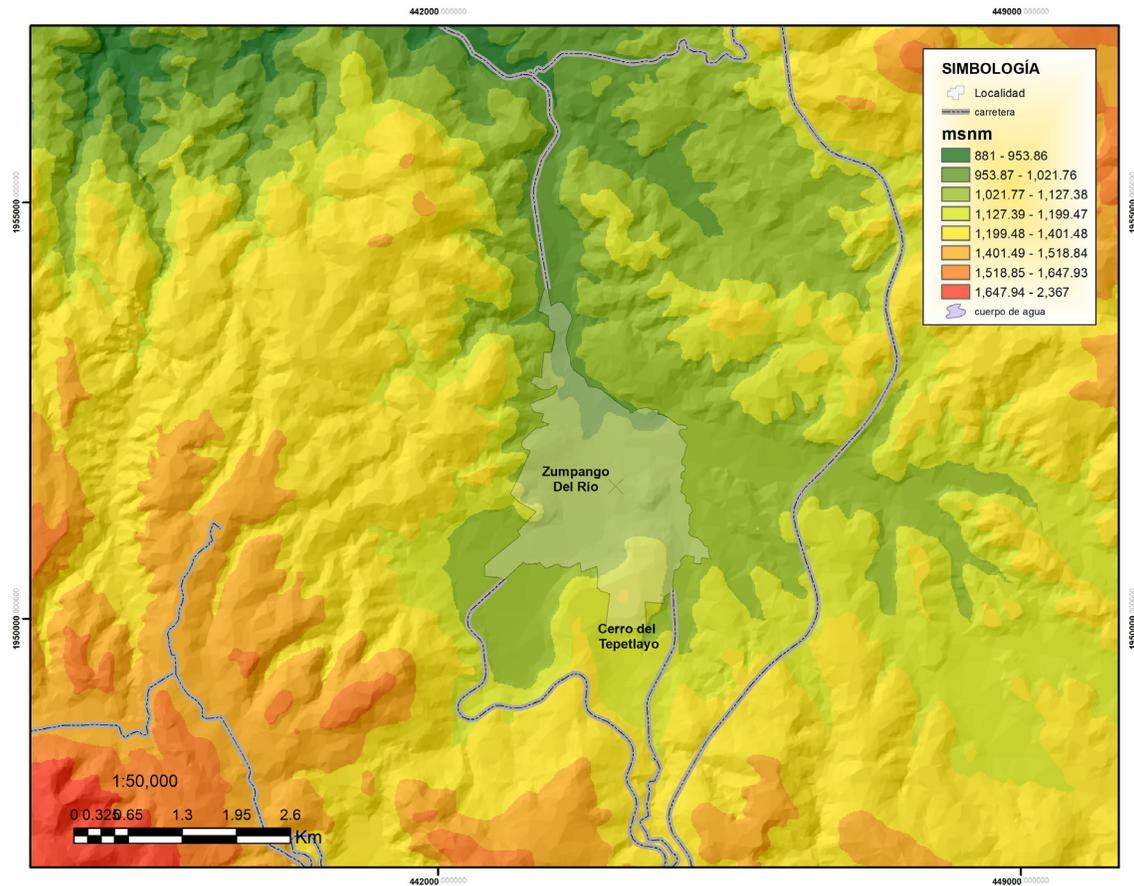
3. Elaboración de cartografía geomorfológica: Para la creación de los mapas temáticos se utilizaron herramientas de integración espacial en los sistemas de información geográfica (SIG) y diferentes herramientas que se encuentran en el software ArcGIS, construyendo de esta manera los siguientes siete mapas:
 - Mapa Hipsométrico
 - Mapa órdenes de drenaje
 - Mapa de pendientes
 - Mapa densidad de disección
 - Mapa energía del relieve
 - Mapa geológico.
 - Mapa de unidades geomorfológicas
4. Análisis de riesgo: Esta etapa se realizó utilizando un juicio de valor descriptivo el cual de acuerdo con Pasek y Briseño (2015), implica la capacidad de distinguir si algo cae o no bajo una regla o criterio dados, si los cumple o no. Los criterios se eligieron de acuerdo con los índices geomorfológicos obtenidos en los mapas temáticos geomorfológicos.

RESULTADOS

De los mapas obtenidos, el hipsométrico o altimétrico (figura 3), es el inicial y uno de los más importantes, esto a pesar de la simplicidad con la que se elabora. En este mapa es fundamental definir, a partir de las curvas de nivel, las alturas máximas y mínimas de los intervalos de valores (para esto no existen reglas, sino criterios). Esto con la finalidad de que exprese de manera inmediata y clara el relieve en su totalidad, simplificando la comprensión del mapa. La elección de colores no es arbitraria, sino que se apoya en un sistema internacional que va de los colores fríos a los cálidos (Espinoza y Arroyo, 2011).

En la zona de estudio se observa que la altitud máxima es de 2,367 ms.n.m, la cual se localiza al sur de Zumpango del Río; mientras que la altitud mínima es de 881 ms.n.m y se localiza al norte. De acuerdo con las unidades geomorfológicas y con lo que muestra el mapa, Zumpango del Río se localiza en un valle intermontano.

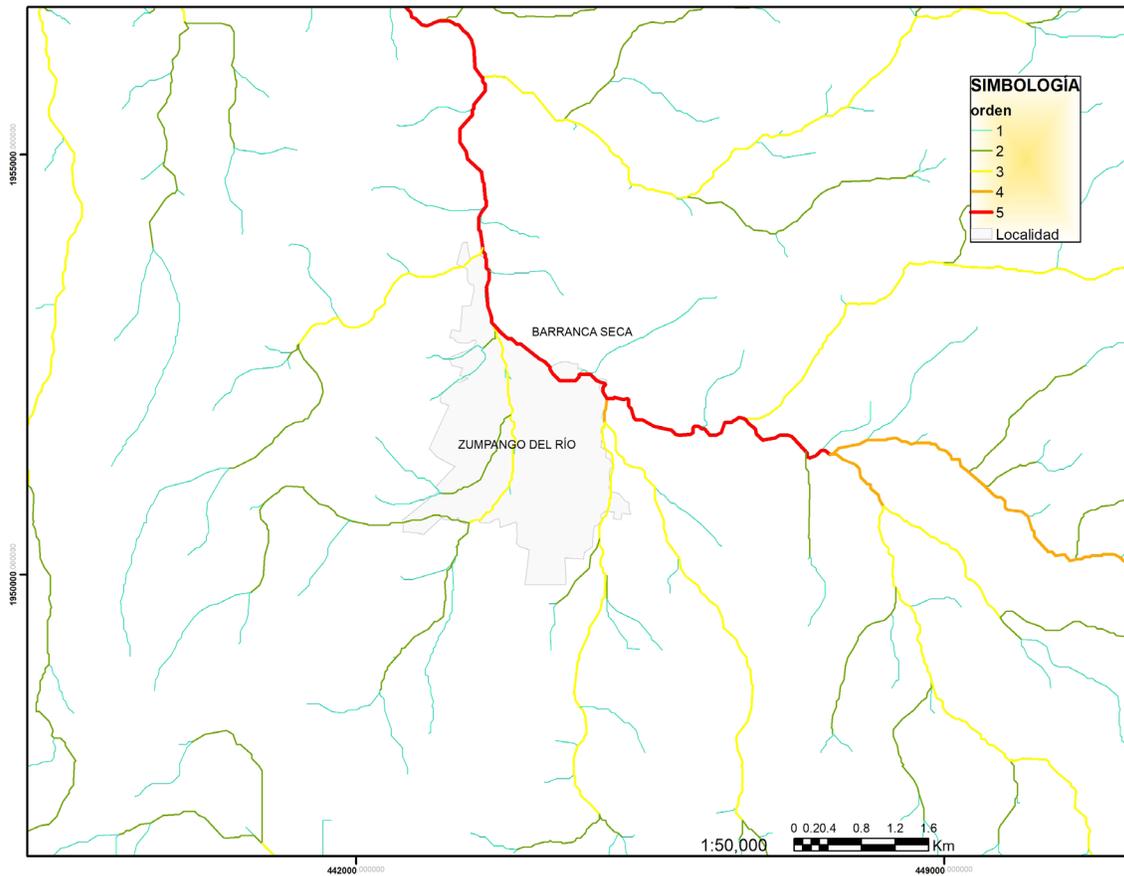
Figura 3. Mapa hipsométrico.



Fuente: Elaboración propia con base en Inegi (2019).

En la Geomorfología, el mapa órdenes de drenaje o corrientes (figura 4) se refiere a la red natural de transporte gravitacional de agua y/o sedimentos formada por ríos, lagos y flujos, alimentados por la lluvia o flujos subterráneos. De acuerdo con Pedraza (1996), en el análisis se considera que los órdenes de corrientes reflejan el proceso evolutivo. De tal forma que, “las corrientes de primer orden son las más jóvenes, con valles de formación incipiente, las de órdenes mayores, en general reflejan las etapas más antiguas de desarrollo de la red fluvial y en muchos casos son indicadores de estructuras sobre las que se han desarrollado los valles fluviales: anticlinales, fracturas, fallas, etc.” (Jiménez, 2018, p.11). En la figura 4 se observa que la red de drenaje es dentrítico y que el de orden mayor se localiza en la parte este de Zumpango del Río, donde se reflejan las etapas más antiguas de desarrollo de la red fluvial.

Figura 4. Mapa órdenes de drenaje.



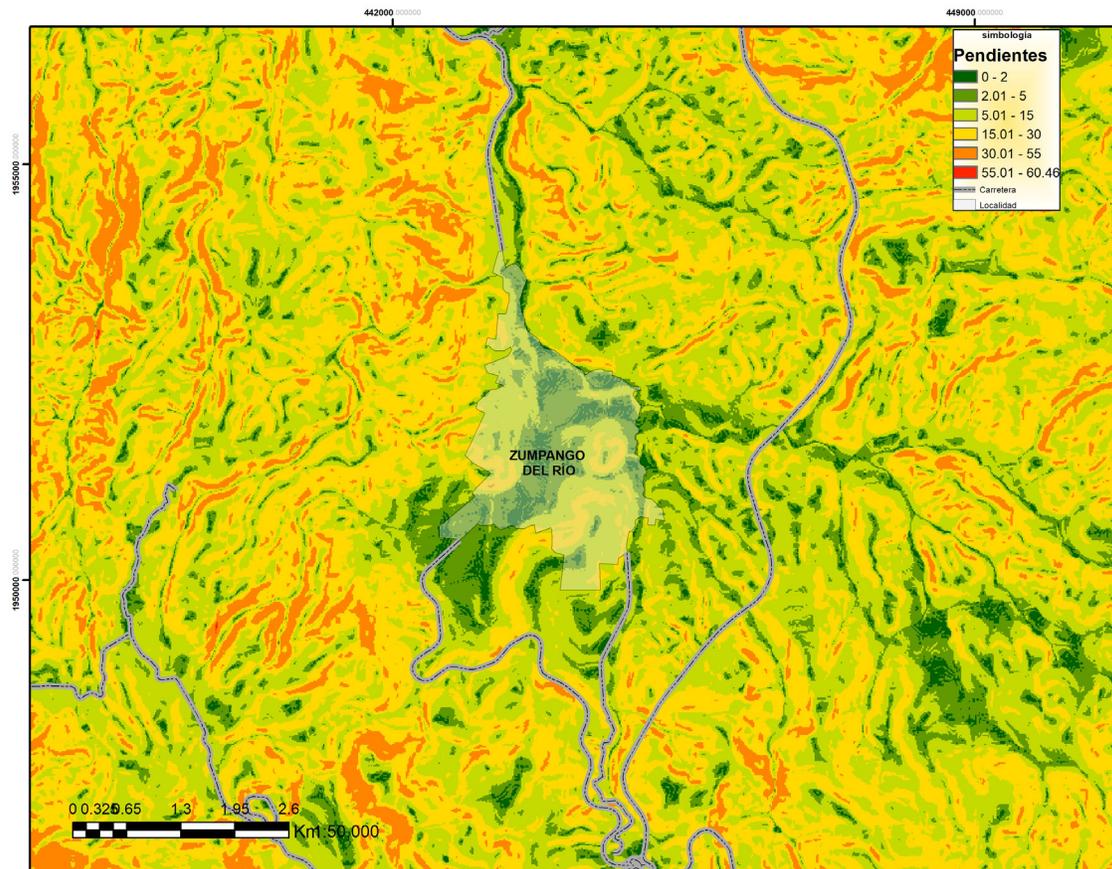
Fuente: Elaboración propia con base en Inegi (2019).

En la figura 5 se muestra el mapa de pendientes. En su concepción más básica, la pendiente es la inclinación del terreno respecto a la horizontal. Para medirla deben establecerse baremos, ya sean cuantitativos (grados o porcentajes) o cualitativos (expresión literal). Los baremos usuales son cuantitativos, refieren grados (entre 0° y 90°) del ángulo de inclinación o porcentaje en la misma. Para analizar formas del terreno tiene una gran importancia el sentido de la inclinación, pues permite reflejar morfologías cuya inclinación es opuesta (p.ej. ambas laderas de un valle) o suplementaria (p.ej. techos, extraplomos, etc.), cualquiera que sea el valor de la pendiente. Por lo general, no suelen calificarse como sentido positivo o negativo, sino como directo o inverso, o bien, simplemente, como sentidos opuestos o cambio de sentido (Pedraza, 1996).

En el mapa de pendientes (figura 5) se puede observar que la zona donde existen rupturas abruptas de pendientes es alrededor de Zumpango del Río, que es donde actualmente se

están formando los asentamientos urbanos. De acuerdo con la clasificación de baremos de Scholz (1972, citado en Hernández, 2014) la zona pertenece a la categoría de relieve escarpado, donde los procesos básicos son la erosión lineal muy incisiva, riesgo extremo de erosión del suelo, deslizamientos, caídos, entre otros fenómenos.

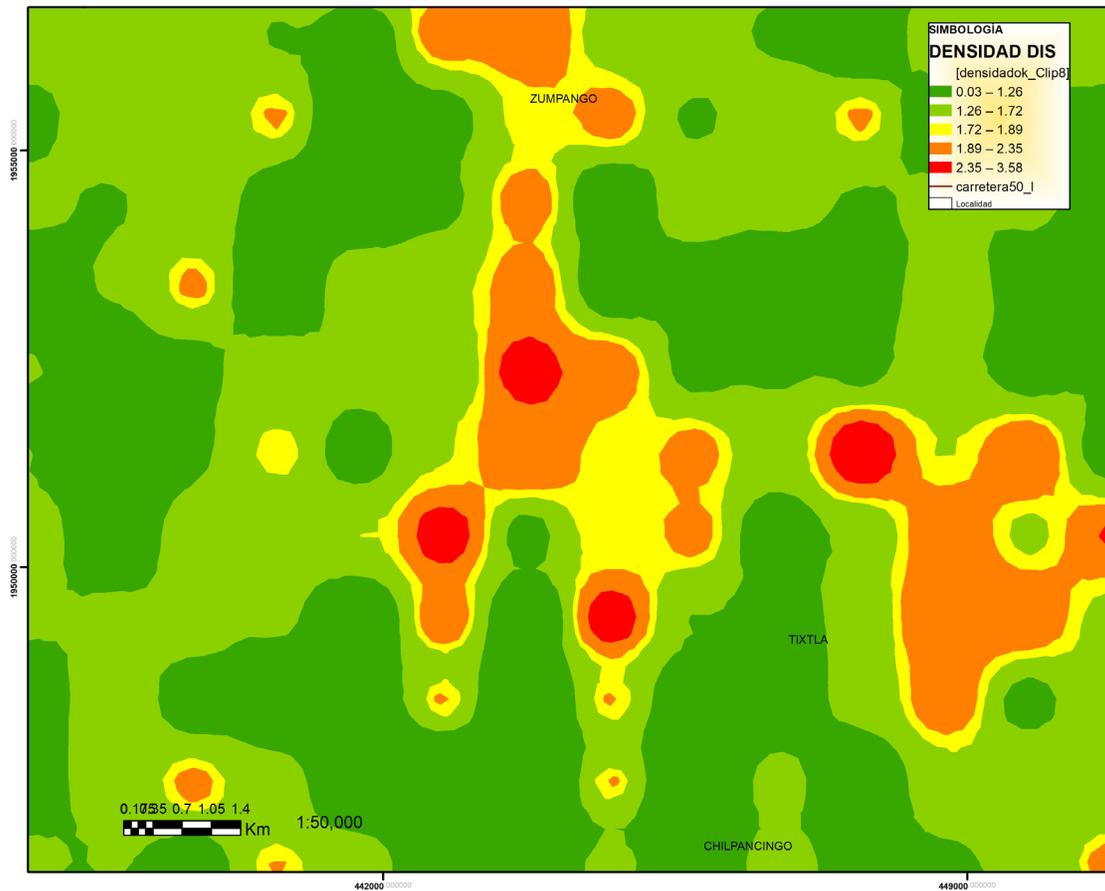
Figura 5. Mapa de pendientes.



Fuente: Elaboración propia con base en Inegi (2019).

El mapa de densidad de disección (figura 6) es el equivalente a la densidad de corrientes fluviales, pero se diferencia de esta porque su objetivo no son las corrientes en sí, sino el resultado de su acción, es decir, los talwegs o vaguadas como líneas originadas por la erosión fluvial. La densidad de disección se define como la longitud de los talwegs (km) en un km². Dentro de Zumpango se encuentran valores que van de los 1.72 a los 2.8 km/km².

Figura 6. Mapa densidad de disección.



Fuente: Elaboración propia con base en Inegi (2019).

Con respecto al mapa de profundidad de disección (figura 7), cuando se trata de territorios extensos, la energía del relieve enuncia la intensidad relativa de la actividad endógena en relación con la exógena. De tal forma que las zonas de mayor actividad tectónica presentan valores altos de energía mientras que los valores bajos se presentan en las zonas más estables (Lugo, 1988).

La profundidad de disección, como expresan Quesada y Barrantes (2017, p.3):

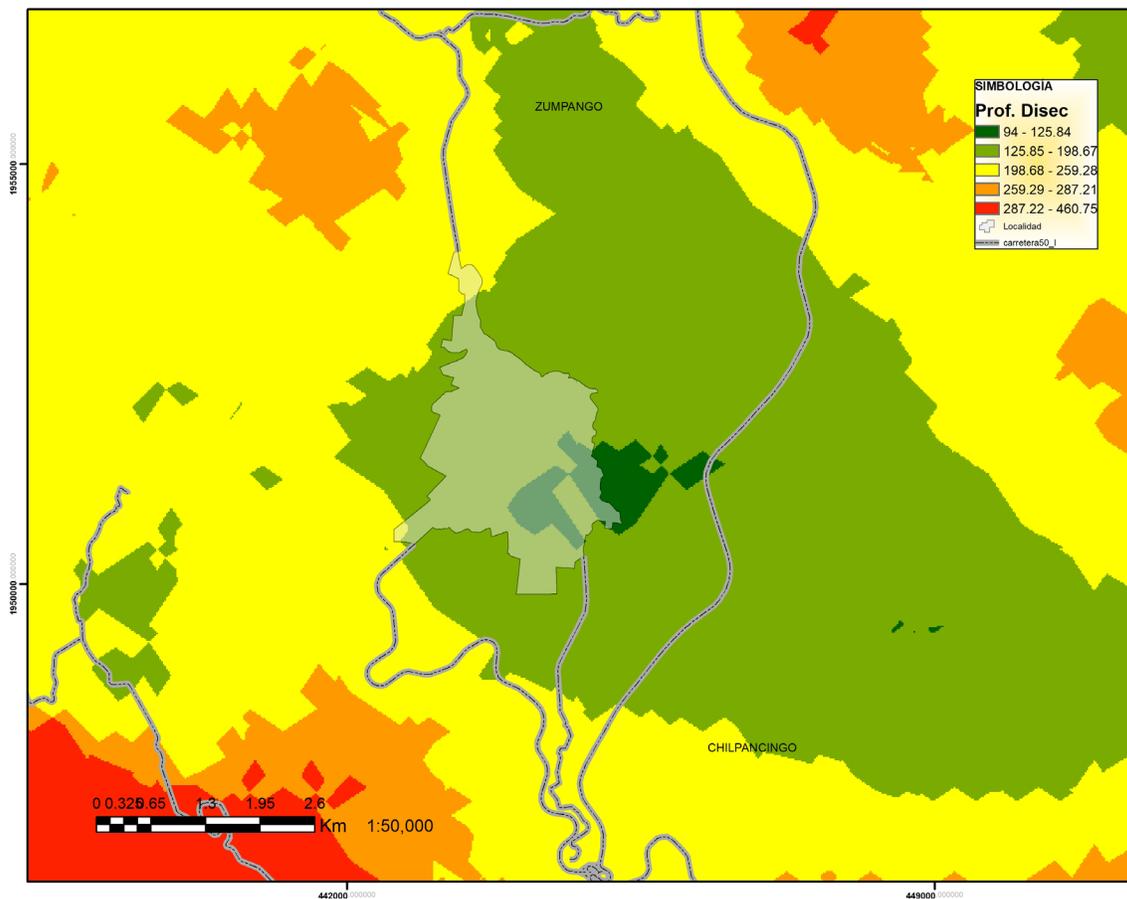
tiene como objetivo medir la capacidad o actividad erosiva de los ríos en la vertical, pues a que analiza las superficies donde la erosión fluvial ha sido más (o menos) intensa a través del tiempo y proporciona una relación indirecta de los parámetros que permiten que la disección aumente como la litología, la inclinación del terreno, la precipitación y los planos de debilidad del sustrato. Se explica como la altura entre el talweg y la

ruptura de pendiente más representativa y próxima a la ladera inferior del valle (por unidad espacial mínima de análisis) expresada en metros.

El proceso de elaboración del mapa temático sobre la profundidad de disección es similar al de densidad, pero la profundidad se mide como la diferencia de altura en cada recuadro dibujado. El mapa tiene como objetivo resaltar la actividad erosiva de los ríos en vertical, el índice se expresa en m/km^2 .

En la figura 7 se puede observar que los valores van de la primera a la tercera categoría, donde los valores más altos se localizan al sur de Zumpango del Río y los más bajos en la parte sureste.

Figura 7. Mapa profundidad de disección.



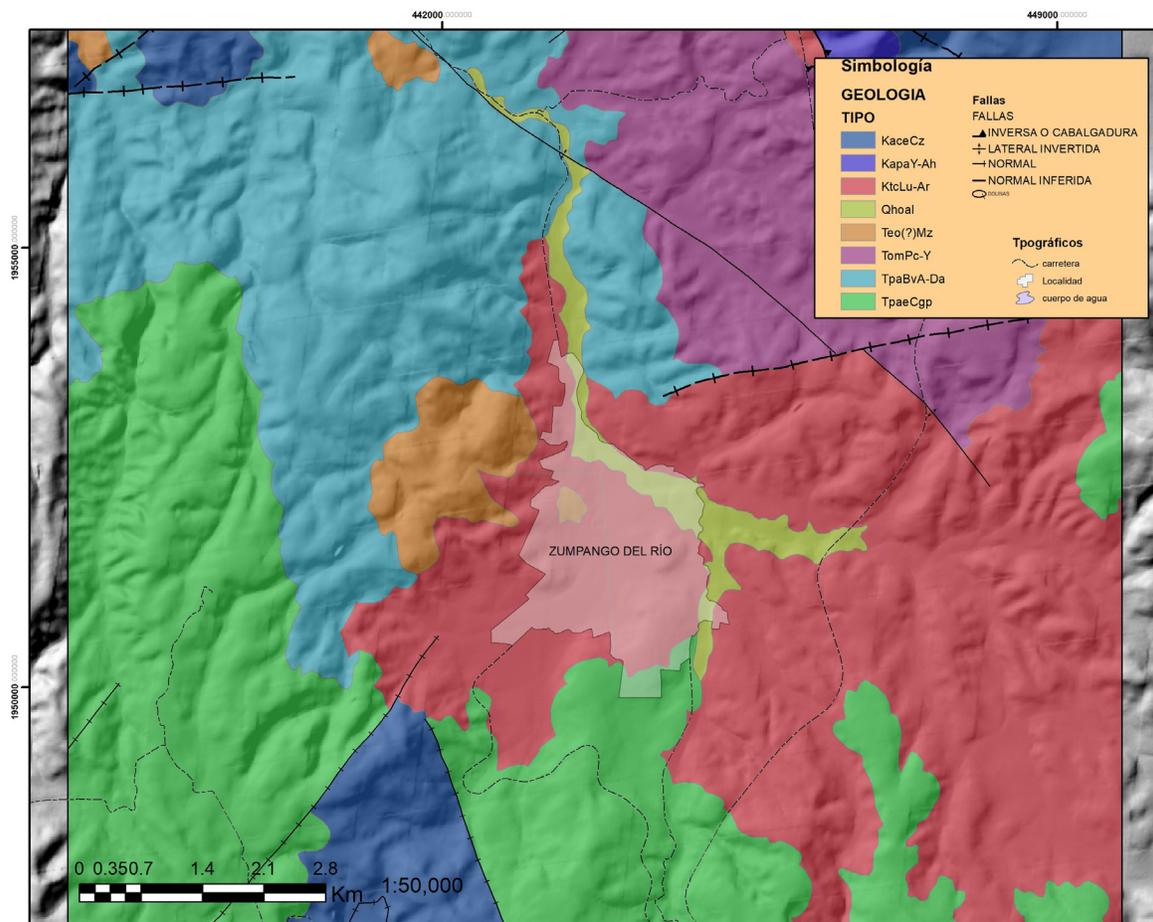
Fuente: Elaboración propia con base en Inegi (2019).

En la elaboración del mapa geológico (figura 8) se utilizó la carta geológico-minera del Servicio Geológico Nacional, debido a que “reúne los aspectos más importantes

y de interés para el sector minero, por lo que constituye una infraestructura básica para el análisis, la interpretación y la selección de áreas susceptibles de prospección y exploración minera a nivel regional y/o local” (SGN, 2020, s.p.). En este mapa, lo único que se realizó fue georreferenciar la imagen y recortar el área que corresponde a la carta topográfica E14C28 Chilpancingo.

En la figura se puede observar que Zumpango del Río está conformado por 4 formaciones geológicas: la mayor parte de Zumpango pertenece al Cretácico superior formado por lutita arenisca siendo esta la formación más antigua; otra parte corresponde al Cuaternario, formado por aluvión, rocas ígneas intrusivas formadas de monzonita; además del Cuaternario conformado por aluvión; y del Terciario paleógeno conformado por conglomerado polimíctico.

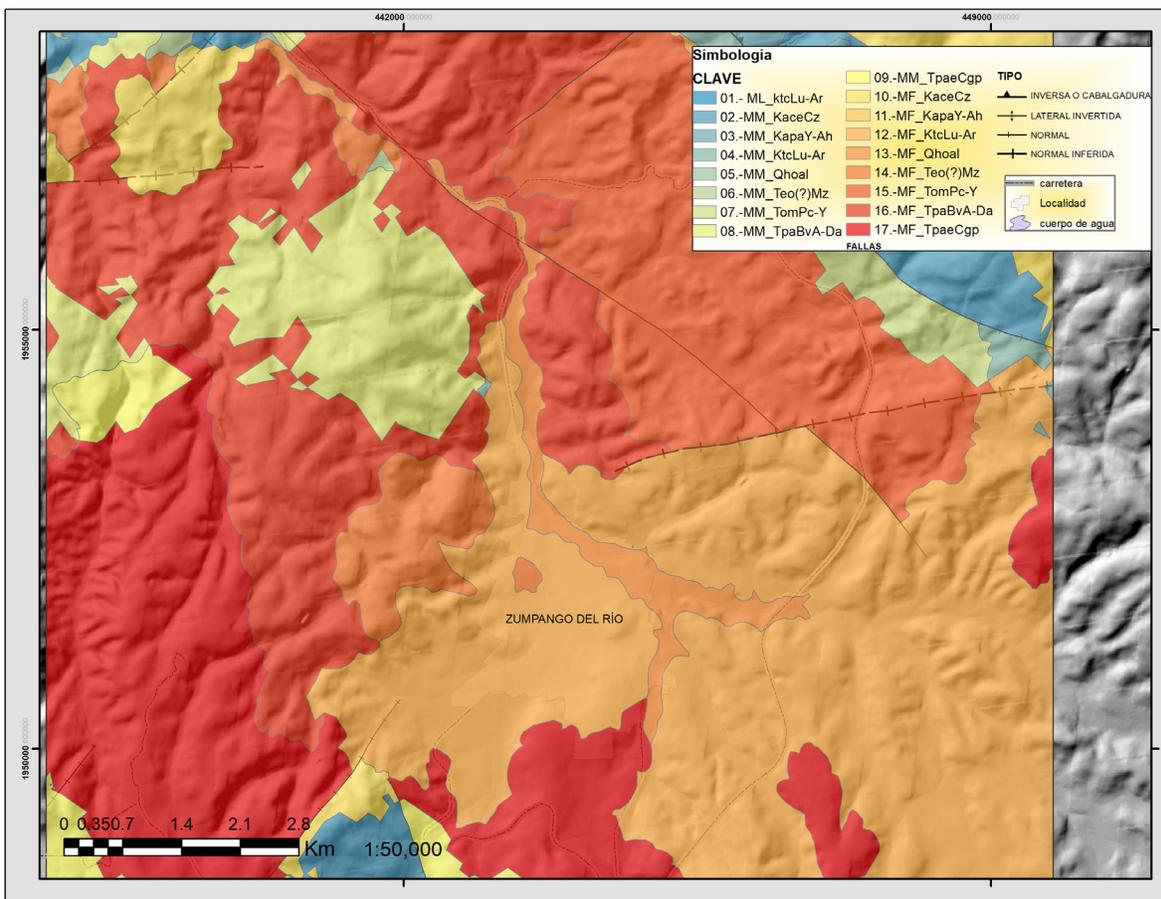
Figura 8. Mapa geológico.



Fuente: Elaboración propia con base en SGN (2020).

El análisis geomorfológico tiene por objeto definir las relaciones espaciales y temporales que existen entre las formas del relieve en un terreno determinado. El punto de partida es la morfogénesis, fundamentada en la clasificación de las formas terrestres de acuerdo con su génesis, morfología, edad relativa y procesos (pueden ser de tipo endógeno y exógeno), que modelan y transforman la superficie terrestre (Frausto, 2002). Dentro del mapa geomorfológico (figura 9), se identifica que las unidades de paisajes que conforman a Zumpango del Río son valles intermontanos, pie de laderas intermontanas, así como valles pluviales.

Figura 9. Mapa geomorfológico.



Fuente: Elaboración propia con base en Inegi (2019).

Para aplicar el juicio de valor se identificaron y aplicaron los criterios disponibles en la tabla 1, los cuales se encuentran relacionados con cada uno de los índices de los mapas temáticos presentados previamente.

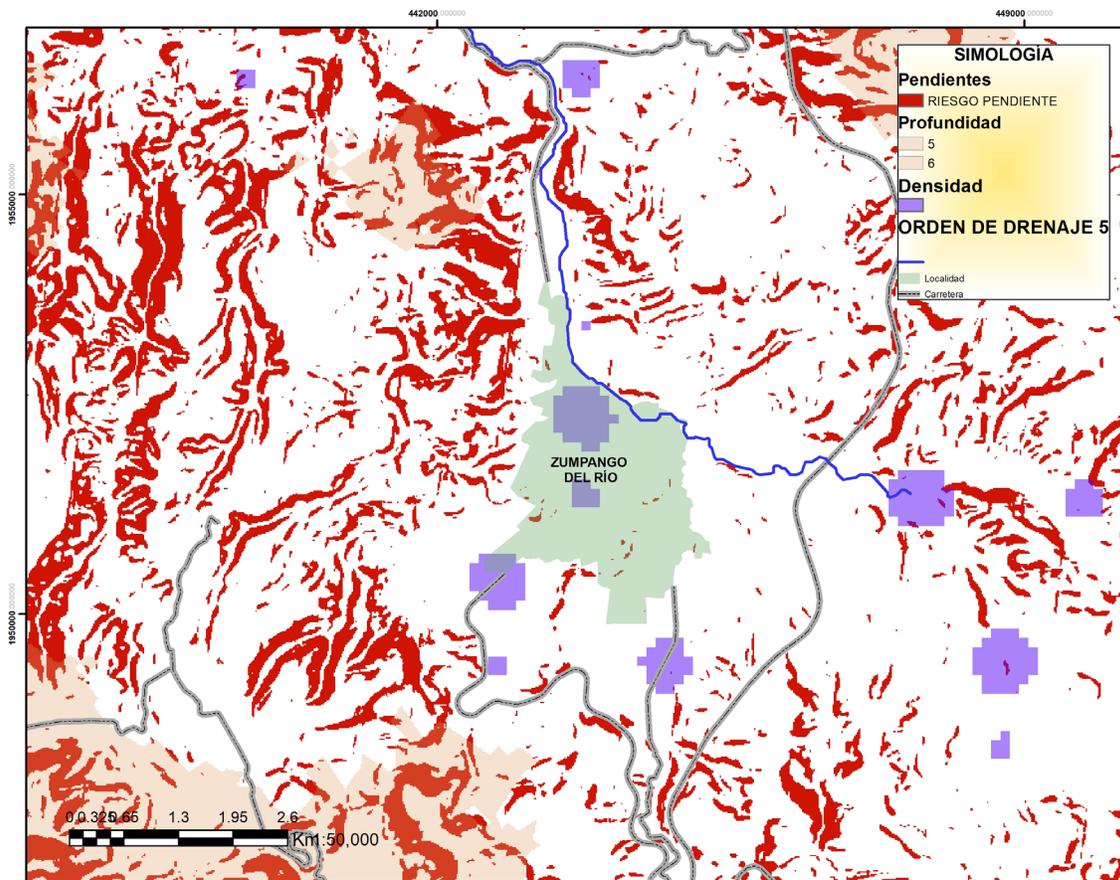
Tabla 1. Criterios para elaborar el mapa final.

| Mapa | Indicador |
|--------------------------|---------------------------|
| Pendientes | >25° |
| Orden de drenaje | = > 5 |
| Densidad de disección | > 2.35 km/km ² |
| Profundidad de disección | > 264 m/km ² |

Fuente: Elaboración propia.

A partir de la aplicación de los criterios anteriores, se obtuvo el mapa final (figura 10) donde se pueden identificar las zonas consideradas como peligrosas por fenómenos geológicos e hidrometeorológicos.

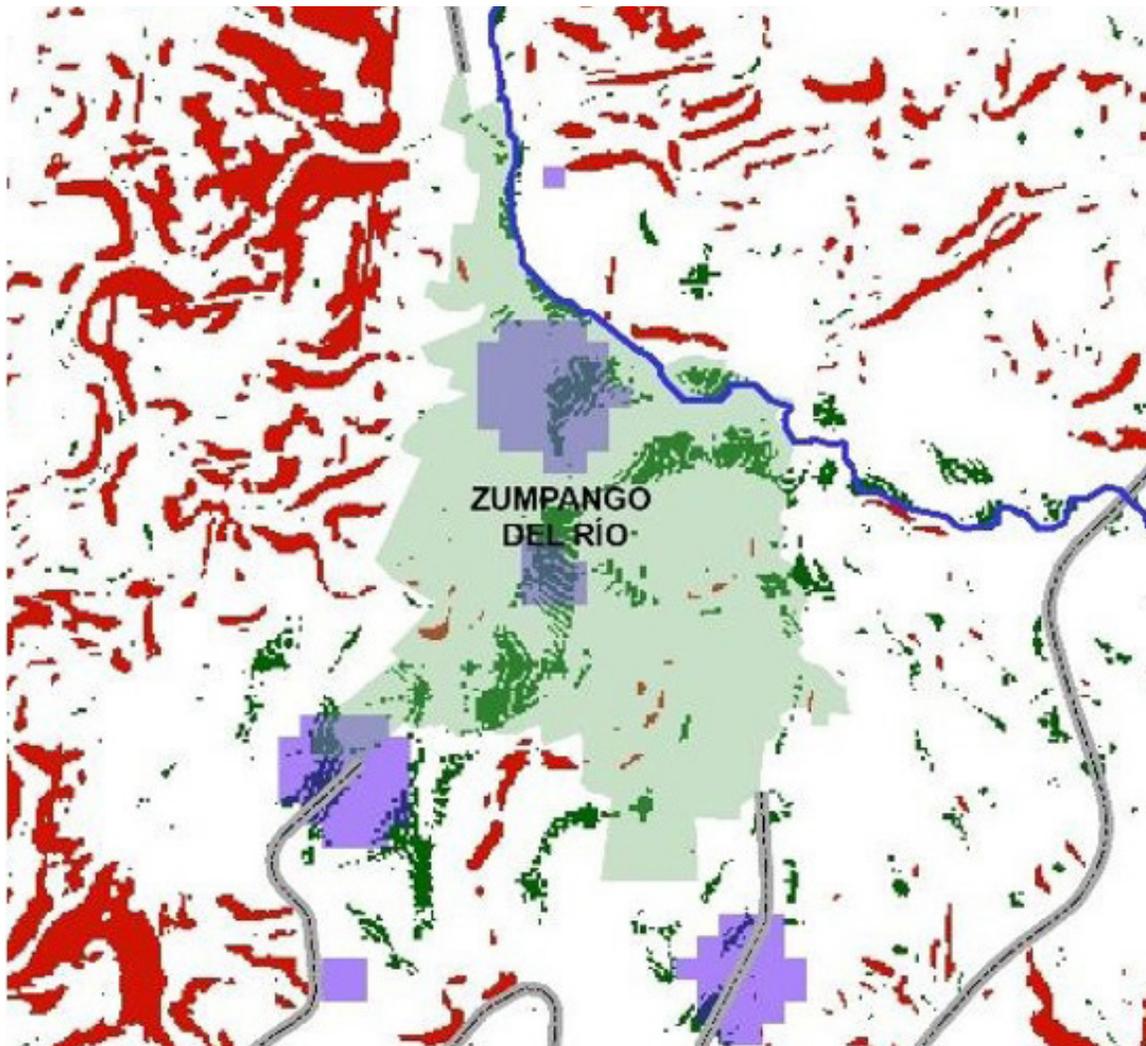
Figura 10. Resultado del mapa juicio de valor.



Fuente: elaboración propia con base en Inegi (2019).

Un acercamiento a Zumpango del Río (figura 11) permite observar con más claridad las localizaciones peligrosas para los asentamientos humanos y para la expansión de la localidad. En ella se identifica la corriente de orden cinco, conocida localmente como Barranca Seca, que se encuentra conformada por aluvión, un material frágil.

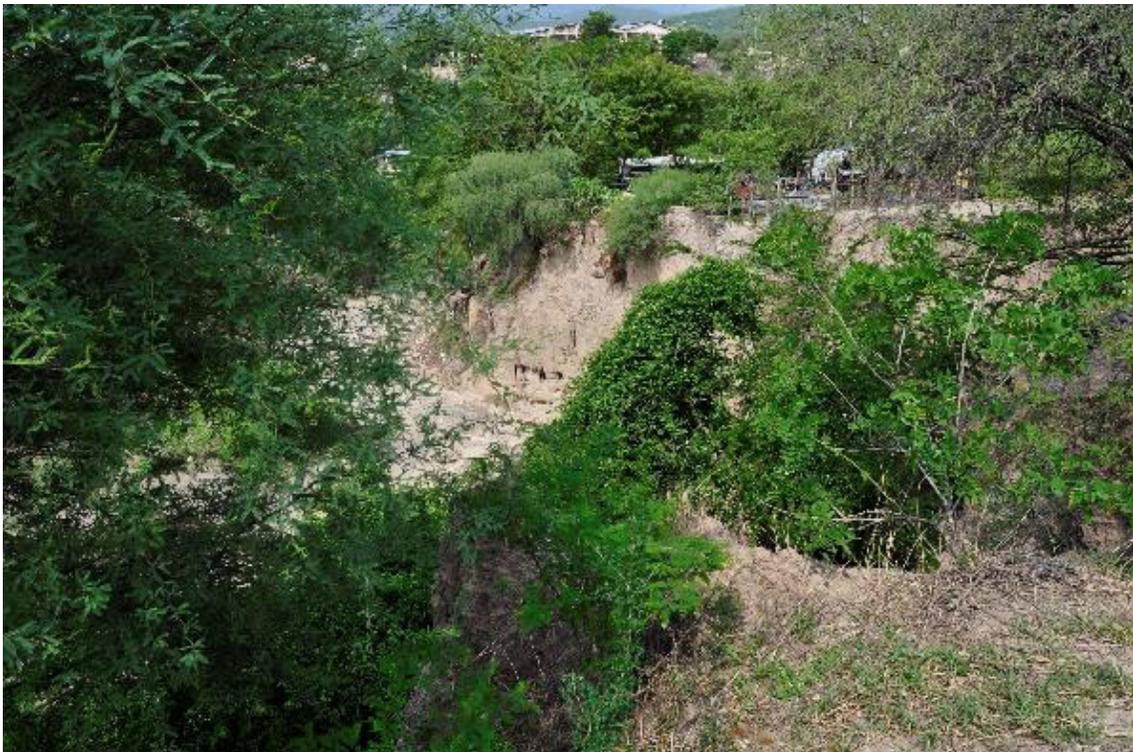
Figura 11. Ubicaciones de peligro para los habitantes de Zumpango del Río.



Fuente: Elaboración propia con base en Inegi (2019).

Algunas evidencias fotográficas de tales localizaciones se obtuvieron en recorridos de campo y se muestran en figura 12, donde se observa la ocupación de zonas no adecuadas o peligrosas.

Figura 12. Asentamientos urbanos “nuevos” en zonas de alto peligro.



Fuente: Tomadas por Elizabeth Nuñez Carachure (2021).

REFLEXIÓN FINAL

De acuerdo con el juicio de valor descriptivo que se aplicó para la creación del mapa final y al Objetivo de Desarrollo Sostenible 11, se puede reflexionar lo siguiente:

En primer lugar, es importante considerar que, para “reducir significativamente el número de muertes causadas por los desastres”, como contempla la meta 11.5, en Zumpango del Río es necesario que las autoridades competentes “adopten e implementen políticas y planes” concretos (meta 11.b); pero, para ello, requieren tener un diagnóstico claro de las amenazas existentes en el territorio y que lo tomen en cuenta en las decisiones relacionadas con los asentamientos humanos. Por ende, es fundamental contar con un atlas de riesgos que oriente las acciones y decisiones tanto en materia de asentamientos humanos como en planeación de emergencias.

A partir de la información generada en este trabajo se puede recomendar a las autoridades competentes en materia de mitigación de riesgos y desarrollo urbano, que eviten la construcción y expansión de asentamientos humanos en y hacia la zona sureste de Zumpango, ya que en esta zona se localiza la corriente de orden cinco o Barranca Seca que carece de un material estable y apropiado para tal fin. Además, se trata de una zona de altas pendientes que, de acuerdo con Scholz (1972, citado en Hernández, 2014), pertenece a la categoría de relieve escarpado, en el que los procesos básicos son la erosión lineal muy incisiva.

Otro dato relevante obtenido en el trabajo es que la zona del valle fluvial es propensa a inundación debido a que es relativamente plana (la pendiente no rebasa los 2°) y no cuenta con protecciones para contener o reorientar las crecidas de las corrientes, por lo que se han presentado inundaciones en varias ocasiones. Además, el mapa final obtenido permite visualizar las zonas peligrosas del lugar y sus características, por lo que es un insumo básico tanto para los habitantes de Zumpango del Río, como para las autoridades correspondientes, quienes a partir de esta información pueden tomar mejores decisiones y establecer estrategias que coadyuven a prevenir desastres y, con ello, contribuyan al logro del ODS 11 de la agenda 2030.

REFERENCIAS

Espinosa, L. y Arroyo, K. (2011). *Geomorfología en México. Una visión histórica, metodológica y aplicada*. España: Editorial Academia Española.

- Gandaria, M. (19 de junio de 2021). Suman a 63 municipios al Atlas Nacional de Riesgo. *El Sol de México*. <https://www.elsoldemexico.com.mx/mexico/sociedad/suman-a-63-municipios-al-atlas-nacional-de-riesgo-6861900.html>
- Frausto, O. (2002). *Análisis geomorfológico enfocado a los procesos de ladera en la sierra de Guadalupe, México* (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. <http://132.248.9.195/pdtestdf/0310757/Index.html>
- Guerrero, M. (2019). Estudio geomorfológico y edafológico en el desarrollo de *Persea americana* (Lauraceae), *Asparagus officinalis* (Asparagaceae) y *Saccharum officinarum* (Poaceae) en la provincia de Trujillo, Perú. *Arnaldoa*, 26 (1): 447 - 464. <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.261.26124>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2019). *Intormación topográfica E14C28 Chilpancingo de los Bravos, escala 1:50:000*. México: Inegi. <https://www.inegi.org.mx/programas/topografia/50000/>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2020). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL)*. México: Inegi. https://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/
- Jiménez, L. A. (2018). *Estudio del peligro geológico por procesos de remoción en masa en la cuenca de Motozintla, Chiapas, México*. (Tesis doctoral). Instituto Politécnico Nacional, México. <https://tesis.ipn.mx/handle/123456789/26566>
- Lugo, J. (1988). *Elementos de geomorfología aplicada (métodos cartográficos)*. México: UNAM.
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2014). *World Urbanization Prospects: The 2014 Revision, Highlights*. Nueva York, EUA.: ONU. <https://www.compassion.com/multimedia/world-urbanization-prospects.pdf>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (2015). *Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Asamblea General, Resolución A/RES/70/.1. https://unctad.org/system/files/official-document/ares70d1_es.pdf
- Pasek, E. y Briceño, R. (2015). Juicios valorativos: elementos y proceso de formulación en la evaluación del aprendizaje. *Actualidades Investigativas en Educación*, 15 (2): 1-28. <https://doi.org/10.15517/aie.v15i2.18958>

- Pedraza, J. (1996). *Geomorfología, Principios, Métodos y Aplicaciones*. Madrid: Rueda.
- Quesada, R. y Barrantes, G. (2017). Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera. *Investigaciones Geográficas*, 94, 1-12. <https://doi.org/10.14350/rig.57318>
- Hernández, S. (2014). *Caracterización morfológica y morfométrica de la carta Toluca* (Tesis de licenciatura). Universidad Autónoma del Estado de México, México. <https://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/30718>
- Servicio Geológico Nacional (SGN). (2020). *Edición de cartas geológico-mineras y geoquímicas escala 1:50,000*. http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed50.jsp

OBTENCIÓN DE PARÁMETROS GEOMORFOMÉTRICOS COMPARANDO GLS, UAV Y MEDICIONES DE CAMPO PARA EL MONITOREO DE DESLIZAMIENTOS URBANOS

Fabiola Doracely Yépez Rincón* y Nelly Lucero Ramírez Serrato**

INTRODUCCIÓN

Las características de la geología, el relieve topográfico, el clima y la vegetación del área donde se asienta el Área Metropolitana de Monterrey (AMM) la exponen a fenómenos de remoción en masa o inestabilidad de laderas. Los deslizamientos y caídas en el AMM están relacionados con eventos de lluvias extremas y llegan a ser sumamente destructivos cuando ocurren en áreas urbanizadas donde hay múltiples elementos que pueden ser afectados o dañados. Por tal motivo, además de que el número de eventos se ha incrementado durante las últimas décadas, sus efectos se han interpretado como una consecuencia del acelerado proceso de urbanización (Thiebes, Glade, Schweigl, Jäger y Canli, 2014; Cenapred, 2001).

La población está aumentando rápidamente y, en algunos casos, se asienta en zonas no aptas para el desarrollo urbano, como las laderas, cuyos cambios en la topografía y uso de suelo modifican la trayectoria de la escorrentía natural (Aguilar, 2017; IRSC y SDSU, 2005), disminuyen los niveles de infiltración y hacen más probable los eventos de

* Universidad Autónoma de Nuevo León.

** Universidad Nacional Autónoma de México.

remoción en masa (Delgado, Hurtado, Avilez y Gómez, 2012), especialmente durante las temporadas de huracanes, debido al incremento de la intensidad y duración de la lluvia (Delgado, Gómez, Peña, Torres y Avilez, 2011).

Los deslizamientos de tierra en áreas urbanas a menudo resultan en pérdidas económicas, daños a la propiedad y pérdida de vidas. La predicción y seguimiento de estos fenómenos y la capacidad de reacción rápida son la base para la gestión de desastres y emergencias. Sin embargo, la capacidad de respuesta a estos fenómenos está altamente ligada a la disponibilidad de datos oportunos de alta calidad, para facilitar la toma de decisiones que debe llevar a cabo el gobierno ante la presencia de los hechos (Cenapred, 2001).

La investigación persigue los siguientes objetivos: 1) evaluar y validar un modelo de sistema de información geográfica (SIG) e implementarlo en el AMM para la zonificación del riesgo de deslizamientos; 2) Poner a prueba diferentes técnicas de recolección de datos como un método de monitoreo de los parámetros geológicos que se necesitan para el modelado SIG. Para esto se utilizan sitios específicos de las montañas donde se hacen pruebas de presentación de geología estructural a través de proyecciones estereográficas, y se demuestra la orientación de los datos estructurales como un importante factor topográfico en el seguimiento de deslizamientos.

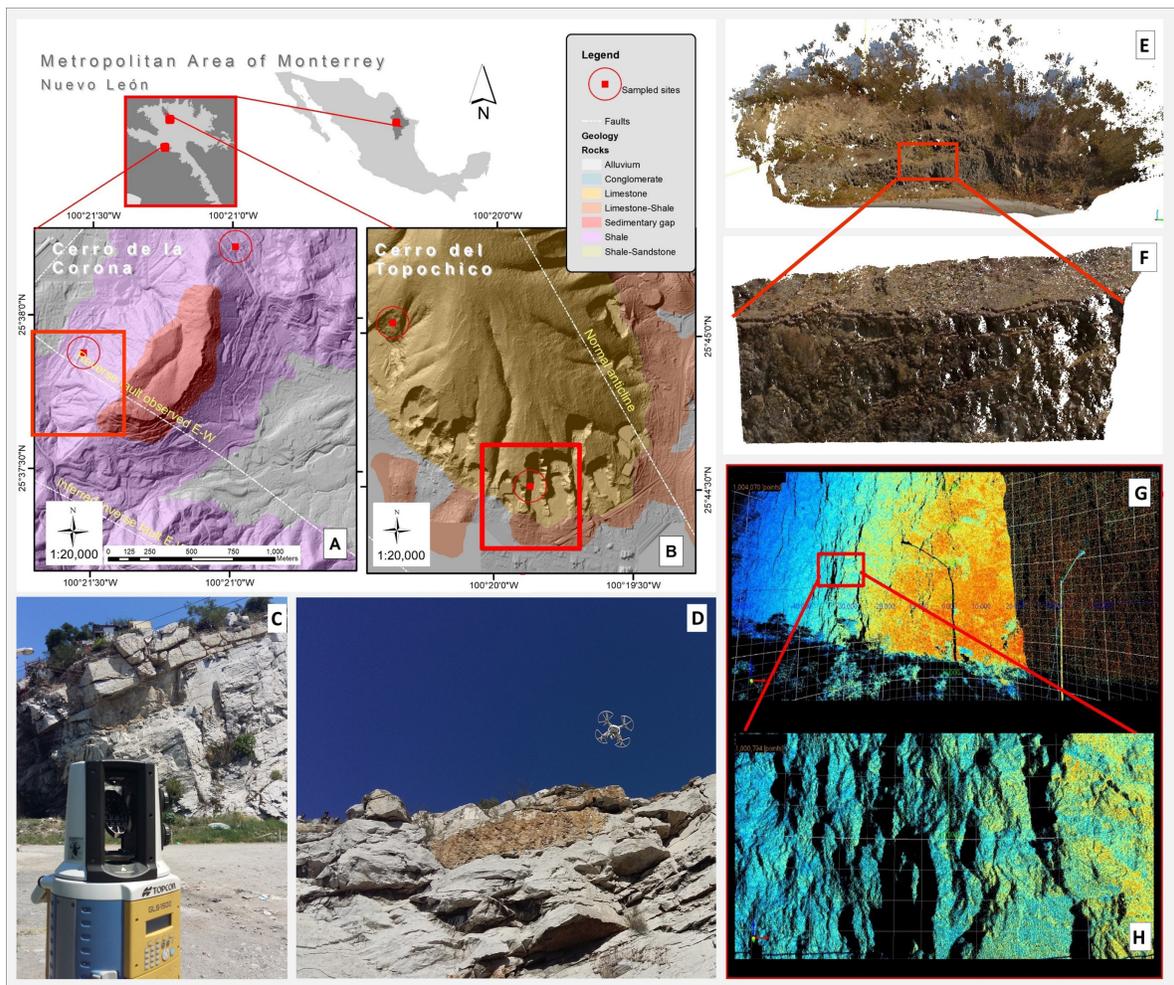
En este caso, se presentan los resultados de sitios específicos que habían sido monitoreados usando tecnología Lidar Terrestre (GLS, por sus siglas en inglés, Ground Laser Scanner, figura 1C), fotogrametría a partir de drones, vehículo aéreo no tripulado (UAV, por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicle, figura 1D) y métodos tradicionales de medición de campo, para evaluar su precisión. Ejemplos de los insumos obtenidos por estas técnicas se pueden observar en las figuras 1E y 1F para el método fotogramétrico y 1G y 1H para el método por GLS, ambas son nubes de puntos XYZ con información de posición de lo obtenido del entorno real.

ÁREA DE ESTUDIO

El AMM está ubicada en el noreste de México (figuras 1A y 1B), es la tercera ciudad más grande de México y cuenta con 5.7 millones de habitantes (Ramírez, 2019; Inegi, 2020; Yépez- Rincón y cols., 2017). La mancha urbana de aproximadamente 1,900 km², extendida sobre la superficie de 12 municipios (los cuales, administrativamente cubren en total 6,700 km² del estado). Está rodeada de montañas en tres de los cuatro puntos cardinales con alturas variables que alcanzan los 3,400 ms.n.m. (Inegi, 2006). Si bien,

el clima es seco y cálido en verano (30°C a 42°C) y frío en invierno (-5°C a 8°C), tiene una precipitación promedio de 580 mm. Además, Monterrey se encuentra en una zona expuesta a huracanes que, cuando se presentan, crean niveles extremos de precipitación, afectando gravemente a la ciudad y a los habitantes; como sucedió durante la temporada de huracanes de 2010 cuando el huracán Alex azotó la ciudad destruyendo parte de la infraestructura de transporte de la ciudad (Ramírez, 2019).

Figura 1. Ubicación de los dos sitios de estudio.



Fuente: Elaboración propia.

Diferentes estudios técnicos y científicos registran un incremento en el número de eventos por deslizamientos durante las últimas décadas en el AMM (Ramírez, 2019; Yépez-Rincón y cols., 2017; Ramírez, Yépez, Ferriño y Huerta, 2019). Se han mencionado factores desencadenantes de los deslizamientos, como la intensidad de las lluvias, el

proceso de urbanización y una alta densificación de su población. La proximidad de las zonas pobladas a pendientes superiores a 45° también va en aumento y continúa extendiéndose, a pesar de la regulación urbanística. Las nuevas construcciones modifican la topografía, crean inestabilidades locales en las rocas sedimentarias que rodean la ciudad, modifican los cambios de uso del suelo y, por lo tanto, interfieren en la trayectoria de los flujos y escurrimientos, lo que reduce los niveles de infiltración.

Aunado a lo anterior, los eventos de inestabilidad de laderas se vuelven más frecuentes después de las precipitaciones extremas. Por ejemplo, en 2010, el huracán Alex provocó severas inundaciones y remociones masivas en diferentes zonas como son: el Cerro de la Campana, el Sector Cumbres en Monterrey y el Cerro de las Mitras. La escorrentía afectó a decenas de familias que fueron desalojadas de sus viviendas por los derrumbes. Durante el mismo año, en el Sector Cumbres en Monterrey, se presentaron deslizamientos en el Cerro de la Corona (figura 1A) y el Cerro del Topochico (figura 1B). Estos hechos provocaron el movimiento de toneladas de roca, lodo y escombros.

MÉTODO

Previamente a este proyecto, en 2015, se generó un modelo SIG que incorpora factores topográficos y geológicos (como pendiente, aspecto y distancia desde el drenaje) a partir de datos aéreos LIDAR (adquiridos en 2010), geotécnicos, ambientales y de infraestructura; y se identificaron las zonas más peligrosas del AMM. El modelo se modificó agregando las tasas de precipitación. Posteriormente, se realizó una campaña de levantamientos de datos geológicos en campo, durante los años 2017 a 2019, para incorporarlos en la actualización del criterio geomorfológico. Los mapas resultantes sirvieron para ubicar áreas altamente vulnerables a deslizamientos o inestabilidad de laderas.

Los sensores remotos utilizados fueron los siguientes:

- a) Escáner Topcon GLS 1500 (figura 1C), con un campo de visión de $360^\circ \times 270^\circ$, precisión superior a 4 mm, capacidad de captura de 30,000 puntos por segundo y alcance efectivo de 150 a 330 m. Posteriormente, fue necesario exportar las nubes de puntos GLS obtenidas por un método directo.
- b) DJI Phantom 3 Professional para imágenes (figura 1D). Se trata de un cuadricóptero con cámara incorporada Sony Exmor $1/2,3''$ con píxeles efectivos: 12.4 Megapíxeles. Los vuelos se realizaron a una altura de 40 m sobre el suelo con franjas paralelas para

lograr al menos 80% de superposición frontal y 70% de superposición lateral. Las nubes de puntos fotogramétricas se generaron con la técnica Structure For Motion (SFM) (Westoby y cols., 2012). Además del GLS, el post-proceso incluyó la producción de nubes de puntos y la exportación de la información a un formato estándar homólogo (.LAS). Las mediciones tradicionales directas se realizaron con una brújula geológica tipo Brunton.

En la figura 1 se muestran algunos ejemplos de los datos obtenidos con fotogrametría (figura 1E) y GLS (figura 1G) con sus respectivos acercamientos para demostrar su resolución (figura 1F) y (figura 1H).

Procedimiento

El modelo SIG previamente obtenido permitió la identificación de los sitios más vulnerables, de los cuales se eligieron dos sitios específicos de interés de aproximadamente 600 m² cada uno) para analizar los parámetros geomorfométricos, utilizando métodos de medición de campo, UAV y GLS. Estos sitios fueron: 1) Colonia San Patricio en el Cerro de la Corona (figura 1A), ubicado en el Municipio de San Pedro Garza García, y 2) Colonia 15 de abril (Fomerrey) en el Cerro del Topo Chico (figura 1B).

Las condiciones de urbanización entre los sitios son extremadamente diferentes, pero ambos se encuentran en la proximidad (≤ 25 m) de material rocoso sedimentario expuesto y con accesibilidad para el muestreo GLS. El Cerro de la Corona, es un área urbana regularizada de viviendas de alto nivel; mientras que en el Cerro Topo Chico se encuentran predios irregulares de habitantes de escasos recursos con acceso limitado a servicios básicos (Muñoz, Conde y Rincón, 1991).

El sitio Topo Chico comenzó como una zona de extracción masiva de cantera. El cierre y posterior abandono del lugar, dejó un paisaje de cortes de ladera abruptos que ahora son utilizados como delimitación de los predios más cercanos a la falda del cerro. A partir de los levantamientos realizados en ambos sitios, se crearon doce nubes de puntos 3D con GLS y fotogrametría. El post-proceso incluyó la producción de nubes de puntos y la exportación de la información a un formato homólogo (.LAS).

Las mediciones directas de campo se realizaron por la metodología tradicional y se registraron rumbos y buzamientos de superficies y fracturas. Los programas de código abierto utilizados para el análisis de procesos, es decir, CloudCompare, el complemento qFacets (Dewez, Girardeau-Montaut, Allanic y Rohmer, 2016) y Stereonet 9 para

Windows (Allmendinger, 2017), facilitaron el procesamiento y tienen la capacidad de trabajar con requisitos computacionales bajos.

Resultados y discusión

Los resultados obtenidos abarcan las reconstrucciones a manera de nubes de puntos (figura 2A), las formaciones estructurales como facetas (Figura 2B) y las medidas obtenidas por metodologías tradicionales con una brújula Brunton sobre las superficies (figura 2C).

Los resultados se trazaron en estereogramas en el hemisferio de Schmidt y se procesaron las nubes de puntos fotogramétricas para el Cerro de la Corona, encontrando automáticamente las facetas planas de las nubes de puntos y extrayéndolas mediante un archivo de forma exportable.

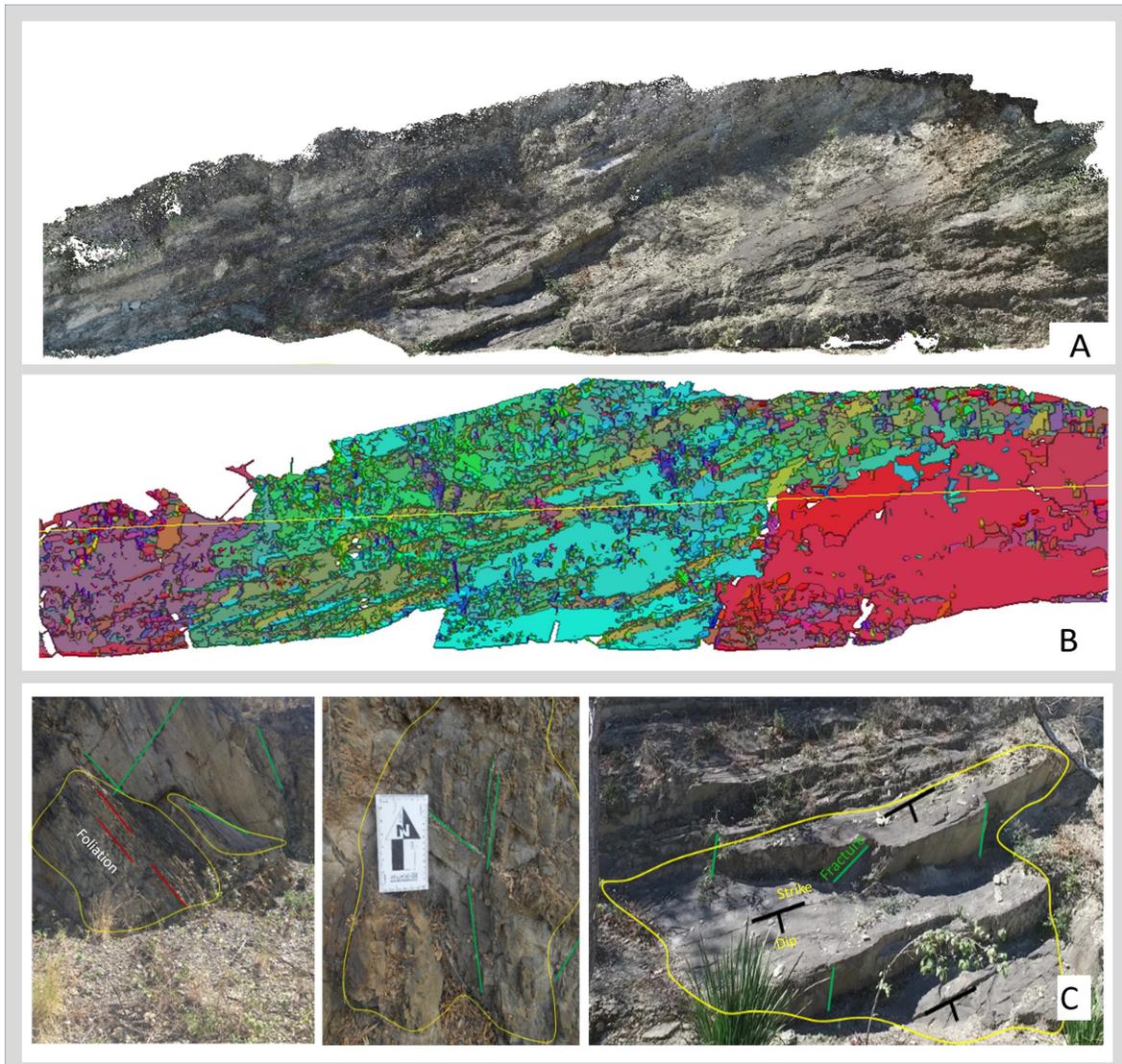
El archivo tiene una clasificación con cada faceta detectada en función de su orientación y su distancia ortogonal (diferentes colores significan un polígono 2D con acimut específicos, figura 2B). Esta información se utilizó para las proyecciones estereográficas, lo que implicó trazar datos 3D en una superficie 2D para su interpretación. Stereonet es un gráfico del hemisferio inferior en el que se puede trazar una variedad de datos geológicos, que reflejan la información de rumbos y buzamientos y el trabajo de campo puede corroborar estas características geológicas estructurales, así como foliaciones y fracturas.

Los resultados del procesamiento se observan en la figura 2. En la parte superior se muestra la nube de puntos resultante de uno de los vuelos del Cerro de la Corona (figura 2A). Este archivo ha sido filtrado previamente para obtener solo lo correspondiente al suelo. En la parte central se muestra el resultado obtenido de la aplicación de la herramienta “Facetas” de CloudCompare, donde cada polígono muestra un color diferente dependiendo de su orientación (figura 2B). En la parte inferior (figura 2C) se muestra parte de las fotografías de campo en entorno real, resaltando lineamientos (verde y azul) y los sitios de muestreo de superficies por metodología tradicional (negro).

Los datos obtenidos a partir de tecnologías GLS y UAV fueron procesados para obtener nubes de puntos con diferentes características de resolución. Cabe aclarar que, UAV (método fotogramétrico) puede alcanzar una resolución de 5 ± 2 cm lo que significa un promedio de 25 a 50 puntos por m^2 en un sitio específico; mientras que GLS puede alcanzar una resolución de 4 ± 2 mm o más de 200 a 400 puntos por m^2 . Por otro lado, el

trabajo de campo fue variable y dependió de la complejidad de la estructura (el número de muestras osciló entre 44 y 72 puntos muestreados por sitio). Cada método produce una nube de puntos que varía en el número de muestras (punto XYZ).

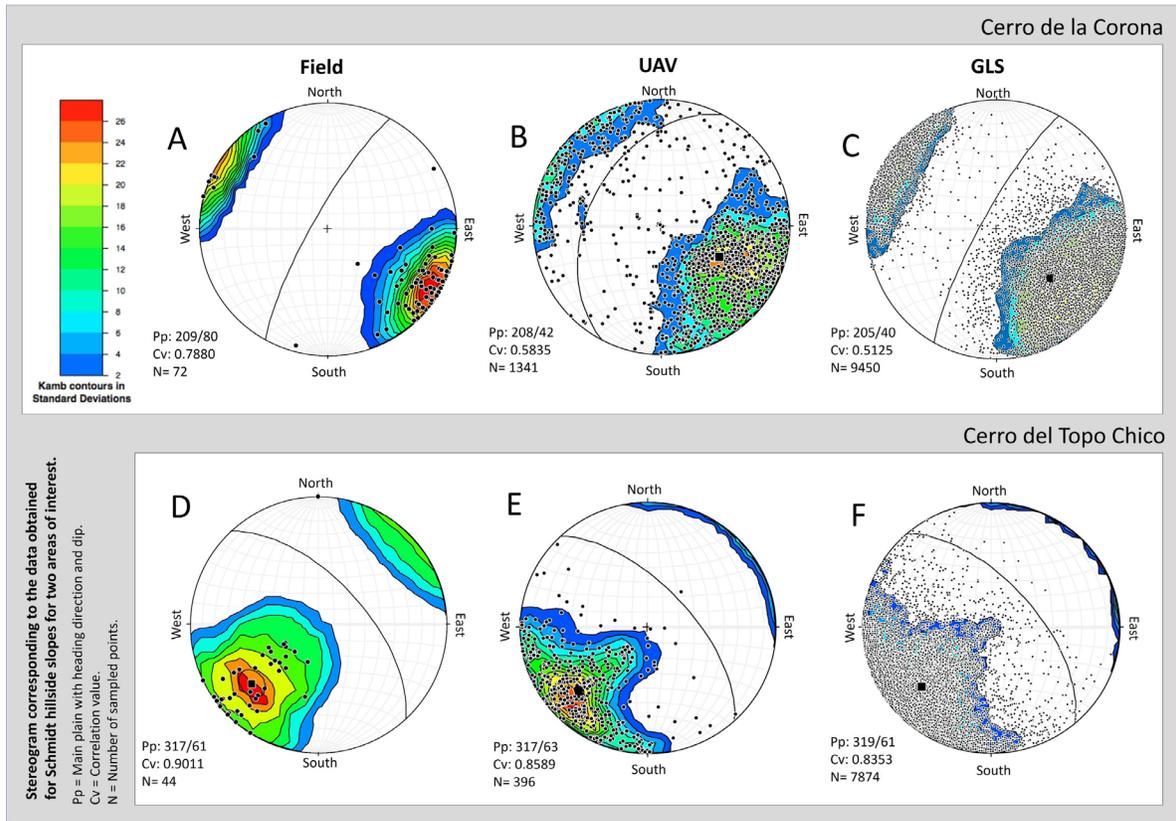
Figura 2. Resultados.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados se trazaron por cada método: 1) Campo (figura 3A y 3D), UAV (Figura 3B y 3E) y GLS (figura 3C y 3F), y muestran valores de correlación lineal que van de 0.51 a 0.90. La comparación de todos los métodos utilizados en este estudio puede garantizar la representatividad de las mediciones. A pesar de las diferencias, todos ofrecen un resultado similar para la clasificación de facetas.

Figura 3. Resultados obtenidos en grafica de los estereogramas correspondientes a los datos obtenidos en cada uno de los sitios de muestreo.



Fuente: Elaboración propia.

REFLEXIÓN FINAL

En este caso de estudio se observó que, aunque GLS puede producir directamente miles de puntos por m², todavía tiene un costo alto en comparación con el UAV; además, es posible que cause una gran incertidumbre, ya que puede enfrentar sombras que no son identificadas por el análisis de facetas automático.

Este trabajo demuestra que el uso de un modelo 3D automatizado, utilizando UAV, tiene el potencial de distinguir cambios en la geomorfología de la pendiente con una precisión de escala centimétrica. La mejora radica en el hecho de que la tecnología de nube de puntos 3D es más rápida que los datos estructurales registrados manualmente, sin embargo, se debe mejorar la precisión. La combinación de imágenes digitales y nubes de puntos 3D son una herramienta flexible y eficiente para determinar cambios en los parámetros geomorfométricos de las rocas en caso de remoción de masa por deslizamientos o ruptura de fallas.

El sistema resultante permitirá una evaluación geoestructural confiable y rápida como alternativa a las propuestas de gestión urbana o mitigación de desastres. Además, la investigación en el tema sigue avanzando en la Universidad Autónoma de Nuevo León, con el apoyo del Grupo Académico “Ciencias del Agua” (UANL-CA-080), y el aporte de las investigaciones de tesis.

REFERENCIAS

- Aguilar, J. J. (2017). *Modelo de evaluación del impacto de la precipitación sobre la inestabilidad de laderas en el área metropolitana de Monterrey, N.L. México* (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Alexander, E. D. (2004). Vulnerability to landslides. En T. Glade, M. G. Anderson y M. J. Crozier (Eds.), *Landslide risk assessment* (pp.175-198). Nueva York, Estados Unidos: John Wiley Publishers.
- Allmendinger, R.W. (2017). *Modern structural practice: A structural geology laboratory manual for the 21st Century*. Estados Unidos: Cornell University.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred). (2001). *Inestabilidad de laderas. Serie Fascículos*. México, D.F.: Cenapred, Secretaría de Gobernación.
- Delgado, L. A., Hurtado, J. C., Avilez, P. y Gómez, G. (2012). Factores geológicos y antrópicos de riesgo en Tijuana, Baja California: El caso del Fraccionamiento Jardines de Agua Caliente. *GEOS*, 32 (2), 1-25.
- Delgado, L. A., Gómez, G., Peña, T. A., Torres, X. G. y Avilez, P. (2011). Rasgos geológicos y morfológicos asociados con peligros naturales en los fraccionamientos El Valle y Hacienda Acueducto, Tijuana, Baja California. *GEOS*, 30 (2), 1-15.
- Dewez, T. J. B., Girardeau-Montaut, D., Allanic, C. y Rohmer, J. (2016). Facets: a cloudcompare plugin to extract geological planes from unstructured 3d point clouds. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B5, 799-804, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-799-2016>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2006). *Modelo digital de elevación de alta resolución LIDAR, Tipo superficie*. http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/fichas_tecnicas.aspx

- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (Inegi). (2020). *Censo de población y vivienda 2020*. Aguascalientes, México: Inegi.
- Institute of Regional Studies of the Californias y San Diego State University (IRSC y SDSU). (2005). *A binational vision for the Tijuana river watershed*. https://irsc.sdsu.edu/_resources/docs/Tijuana_River_Watershed_Binational_Vision.pdf
- Muñoz, B., Conde, R. y Rincón, J. I. (1991). *Evaluación de riesgos por urbanización en las zonas montañosas de Monterrey, N.L.* Monterrey, México: UANL.
- Ramírez, N. L., Yépez, F. D., Ferriño, A. L. y Huerta, R. E. (2019). Propuesta metodológica para Actualización de Modelos SIG de susceptibilidad a deslizamientos a escala local con VANTS, área de estudio: Zona Metropolitana de Monterrey. En C. Noyola (Ed.), *Aproximaciones Tecnológicas de Vanguardia en la Geomática, Geodesia y Geoinformática en México* (pp. 277-288). San Luis Potosí, México: UASLP.
- Ramírez, N. L. (2019). *Diseño y validación de modelos de predicción espacial para cartografiar susceptibilidad por deslizamientos en la zona metropolitana de Monterrey, N.L. México* (Tesis de doctorado). Universidad Autónoma de Nuevo León, Monterrey, México.
- Thiebes, B., Glade, T., Schweigl, J., Jäger, S. y Canli, E. (2014). Landslide monitoring and early warning systems in Lower Austria-current situation and new developments. *Geophysical Research Abstracts*, 16. EGU2014-13676.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M. (2012). 'Structure- from- Motion' photogrammetry: A low- cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179, 300–314. <http://doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.08.021>
- Yépez- Rincón, F. D., Ramírez-Serrato, N. L., Aguilar, J. J., Caballero- Ramírez, V. H., Lozano-García, D. F., Guerra- Cobián, V. H., y Jiménez- Miguel, F. (2017). Modelo SIG para la zonificación de peligro por inestabilidad de laderas-Caso de estudio: área metropolitana de Monterrey, México. *Serie Correlación Geológica*, 33 (1-2), 27-40. <https://www.insugeo.org.ar/publicaciones/docs/scg-33-0-03.pdf>

CONCLUSIÓN GENERAL

En esta obra se ha explorado el riesgo de desastre desde diversas disciplinas a partir de herramientas, instrumentos y datos basados en geotecnologías como son los sistemas de información geográfica (SIG), las imágenes de satélite, los vehículos aéreos no tripulados, los modelos digitales de elevación, la tecnología LiDAR, los índices sintéticos, entre otros, que permitieron un acercamiento al territorio desde múltiples escalas y temas.

En materia de riesgo químico, como una amenaza a la biodiversidad, se desarrollaron modelos e índices para la predicción de los incendios forestales, considerando que, si bien, el fuego puede ser parte de los ciclos de regeneración de la naturaleza, su intensidad y frecuencia actuales se deben principalmente a las acciones humanas directas e indirectas que se llevan a cabo en la escala local. Entre los factores más importantes se encuentran las modificaciones a los patrones de lluvia derivados del cambio climático, con ejemplos evidentes como los fenómenos de El Niño y La Niña.

El cambio climático es un proceso global complejo que se deriva de la concentración atmosférica de gases de efecto invernadero producidos principalmente por las actividades humanas. Adicionalmente, en la escala local, las emisiones de contaminantes atmosféricos representan una amenaza a la salud de los habitantes próximos a las fuentes emisoras. Dado que el monitoreo atmosférico ha sido impreciso e inconstante en el territorio mexicano, la respuesta tecnológica y científica ha sido el desarrollo de alternativas, como las presentadas en este libro, con el uso de bioindicadores, imágenes

de satélite y modelos SIG.

Por su parte, algunas actividades económicas producen riqueza mediante la generación de contaminación ambiental, por lo que la estimación de sus emisiones e impactos, así como la propuesta vertida en este documento de indicadores que permiten contrastar los beneficios económicos con la contaminación que generan, son insumos básicos para la toma de decisiones en la búsqueda de un crecimiento económico con el menor costo ambiental posible.

En materia de riesgo sanitario, una amenaza emergente y actual es la pandemia por COVID-19 que, entre otras cosas, paralizó temporalmente las economías del mundo y generó cuantiosos daños, así como pérdidas humanas. Si bien, el desastre sanitario tiene como peligro un virus, son las condiciones inseguras de la población las que definen el tipo y tamaño del impacto. En este sentido, la utilización de indicadores de pobreza y vulnerabilidad poblacional es fundamental para generar conocimiento que permita orientar políticas públicas hacia la reducción de desigualdades y fragilidades frente a las distintas amenazas presentes en el entorno.

Con respecto a los riesgos geológico e hidrometeorológico, expresados en amenazas geomorfológicas como laderas inestables, barrancas y valles de inundación, son producto del asentamiento humano en zonas peligrosas. Una característica de este tipo de amenazas es que generalmente abarcan grandes superficies del territorio, algunas de ellas difícilmente accesibles, por lo que en su estudio es indispensable la utilización de herramientas geotecnológicas como las imágenes de satélite, los SIG y los vehículos aéreos no tripulados.

A lo largo de este libro se ha hecho énfasis en la importancia de identificar y monitorear las amenazas que están presentes en el territorio, así como la exposición y la vulnerabilidad de la población ante ellas, para tener un mejor conocimiento de los riesgos existentes y que se sustenten las decisiones tendientes a su mitigación. En este camino, la utilización de geotecnologías en el análisis de riesgo y el desarrollo de métodos, modelos e indicadores de evaluación constituyen una valiosa aportación por parte de la comunidad académica.

Para concluir, la reducción del riesgo de desastre como camino al desarrollo sostenible es una de las grandes tareas pendientes y urgentes a nivel mundial. A partir de las aproximaciones al tema vertidas en esta obra, se espera contribuir a la prioridad uno del Marco de Sendai, que es “comprender el riesgo de desastres”. Esto, como señala

tal documento, a partir de recopilar, generar y analizar datos pertinentes; de dar seguimiento a los riesgos; de hacer uso de información espacial e in situ junto con los SIG; de promover el diálogo entre las comunidades científicas y tecnológicas; de elaborar y aplicar metodologías y modelos para evaluar los riesgos de desastres; así como de reforzar la capacidad técnica y científica.

Geotecnologías en el análisis de riesgos
se terminó de editar en el Instituto de Investigaciones Sociales de
la Universidad Autónoma de Baja California
en el mes de ~~bcj~~ ~~JYa~~ ~~VfY~~ de 2022

Publicación electrónica
con distribución por internet

Universidad Autónoma de Baja California
Universidad Autónoma de Nuevo León



