

# CURVA DE APRENDIZAJE EN LA GESTIÓN MULTIDIMENSIONAL

DEL RIESGO

OSCAR FRAUSTO - MARTÍNEZ  
ROSALVA PÉREZ GUTIÉRREZ  
JULIO CESAR MORALES HERNÁNDEZ  
COORDINADORES



# **CURVA DE APRENDIZAJE EN LA GESTIÓN MULTIDIMENSIONAL DEL RIESGO**

Coordinadores:

Oscar Frausto Martínez, Rosalva Pérez Gutiérrez y  
Julio César Morales Hernández

Enero 2024

## **CURVA DE APRENDIZAJE EN LA GESTIÓN MULTIDIMENSIONAL DEL RIESGO**

© Sobre la presente edición:

Oscar Frausto Martínez, Rosalva Pérez Gutiérrez y Julio César Morales Hernández.  
Universidad Autónoma de Guerrero, Red de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos, 2024.  
Conachyt

ISBN: 978-607-8755-64-6

Edición: Gema Alín Martínez Ocampo  
Diseño editorial, formación y portada: Gema Alín Martínez Ocampo

Ilustración de portada y contraportada:  
Creada en Adobe firefly por Gema Martínez

EDITORIAL UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE GUERRERO

Cita recomendada para esta publicación  
Frausto - Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R. y Morales Hernández, J. L. (2024). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim, México. 233 p.

# COMITÉ TÉCNICO ACADÉMICO

- Dra. Areli Nájera González** – Universidad Autónoma de Nayarit  
**Dr. Benjamín Castillo Elías** – Universidad Autónoma de Guerrero  
**Dra. Denise Freitas Soares de Moraes** – Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
**Dra. Lorena Anaya Ortega** – Universidad de Guadalajara  
**Dra. Fátima Maciel Carrillo González** – Universidad de Guadalajara  
**Dr. Francisco Bautista Zúñiga** – Universidad Nacional Autónoma de México  
**C.Dr. Gabriel Origel Gutiérrez** - Geoinformatica ABCMap  
**Dr. Álvaro Gerardo Palacio Aponte** - Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
**Dr. Gouritin Armeli** - Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales  
**Dr. Hugo Ignacio Rodríguez García** - Universidad Autónoma de la Ciudad de México  
**M. en C. Jorge Humberto Bravo** - Stevens Institute of Technology  
**Dr. José Manuel Camacho Sanabria** – Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo  
**Dr. Juan Alfredo Cabrera Hernández** – Universidad de Matanzas  
**Dr. Julio Cesar Morales Hernández** – Universidad de Guadalajara  
**Dra. Luz de Lourdes Coronado Álvarez** - Universidad Autónoma de Baja California  
**Dr. Luis Manuel Farfán Molina** - Centro de Investigación Científica  
y de Educación Superior de Ensenada  
**Dr. Manuel Eduardo Mendoza Cantú** – Universidad Nacional Autónoma de México  
**Dra. María Luisa Hernández Aguilar** - Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo  
**Dr. Martín José Montero Martínez** - Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  
**Dra. Masuly Guadalupe Vega Puga** – Universidad de Sonora  
**Dra. Natasha Mylena Quevedo Castañon** – Universidad Autónoma de Guerrero  
**Dr. Oscar Antonio Dzul García** – Universidad Autónoma de Zacatecas  
**Dr. Paris Rivera** - Universidad Mariano Gálvez  
**Dr. Raymundo Padilla Lozoya** – Universidad de Colima  
**Dra. Rosalva Pérez Gutiérrez** – Universidad Autónoma de Guerrero  
**Dr. Teodoro Carlón Allende** – Universidad Nacional Autónoma de México  
**Dr. Víctor Manuel Jiménez Escudero** – Universidad Nacional Autónoma de México  
**M. en C. Víctor Manuel Cornejo López** – Universidad de Guadalajara

Los capítulos se sometieron a dictamen bajo el sistema doble ciego y se aceptaron aquellos que cumplieron con el proceso de revisión y corrección del dictamen.

# COMITÉ EDITORIAL

Dr. Oscar Frausto Martínez  
Dra. Rosalva Pérez Gutiérrez  
Dr. Julio Cesar Morales Hernández

# Contenido

<b>Presentación CENAPRED</b>	<b>9</b>
<b>Presentación REDESClim</b>	<b>11</b>
<b>Introducción</b>	<b>13</b>
<b>1.</b> Tormentas tropicales en Guerrero, México: lecciones aprendidas para las políticas públicas	19
<b>2.</b> Caracterización de las velocidades de traslación de los ciclones tropicales del Atlántico Norte	37
<b>3.</b> Estimación de precipitación por el huracán Ingrid en Veracruz, México	53
<b>4.</b> Comparativa entre el Fire Weather Index y los incendios registrados en México (2015-2020) e interpretación multidisciplinaria de los resultados	69
<b>5.</b> Contaminación atmosférica relacionada a la dispersión de polvo mineral en el Valle de México	87
<b>6.</b> Zonificación del riesgo ante la escasez hídrica en cuencas de la costa occidente de México	105
<b>7.</b> Análisis del riesgo por inundación en la zona urbana del municipio de Tlaltenango, Zacatecas	121
<b>8.</b> Riesgo socioambiental asociado al fenómeno lluvia - escurrimiento en tiraderos de residuos sólidos urbanos en Ensenada, Baja California	139
<b>9.</b> Sequía y crecimiento de la enfermedad del dengue en México	161
<b>10.</b> Emisiones de metano, sequía y cambio climático en la región Huasteca Potosina: innovación en la gestión del riesgo a partir SENTINEL-5P y modelado espacial	173
<b>11.</b> Los retos de la comunicación estratégica ante los eventos meteorológicos extremos: el caso de Jalisco	189
<b>12.</b> Conmemoración de catástrofes: acciones monumentales posdesastre ante fenómenos hidrometeorológicos extremos	207
<b>Biodata de los autores</b>	<b>223</b>



## Presentación

En México, al igual que en muchas otras partes del mundo, se observa una tendencia creciente en el número e impacto de los desastres, especialmente en un contexto marcado por el cambio climático. Ante esta realidad, se hace imperativo impulsar de manera decidida la gestión del riesgo con un enfoque integral, tratándolo como un asunto prioritario que ayude a prevenir la generación de nuevos riesgos en el desarrollo y crecimiento de las comunidades, minimizar los riesgos ya existentes, prepararse para una respuesta efectiva y lograr una reconstrucción más resiliente. La base para la toma de decisiones efectivas en estas materias radica en una profunda comprensión del riesgo de desastres, lo cual implica un conocimiento amplio sobre las amenazas, tanto naturales como antrópicas, analizando sus características, frecuencia y potenciales impactos, así como identificar y evaluar las vulnerabilidades de los sistemas expuestos.

El libro “Curva de Aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo de desastre” constituye un valioso compendio de investigaciones enfocadas en la comprensión y reducción de los riesgos asociados a fenómenos naturales y provocados por el ser humano en México. A lo largo de siete capítulos, en los que participaron veintiún especialistas de diversas disciplinas pertenecientes a diez instituciones académicas, esta obra ofrece una visión enriquecedora sobre la gestión del riesgo de desastres, incidiendo particularmente en las realidades y desafíos que se presentan en distintas regiones del país.

Mediante un enfoque multidisciplinario, se resalta la importancia de entender los fenómenos naturales y su interacción con los aspectos humanos y sociales, con el objetivo de fortalecer la capacidad de respuesta y resiliencia de las comunidades vulnerables. Se abordan temas tan variados como el análisis de tormentas tropicales en Guerrero, la caracterización de ciclones, la zonificación de riesgos por escasez hídrica y estudios de riesgo de inundación en áreas específicas, además del riesgo de incendios asociado a condiciones ambientales y la contaminación atmosférica derivada de la dispersión de polvo mineral en el Valle de México.

Cada capítulo brinda una perspectiva sobre los distintos retos que México enfrenta en términos de riesgo de desastres, ofreciendo lecciones aprendidas, modelos de pronóstico y apoyando la formulación de estrategias de reducción de riesgos sustentadas en la evidencia científica. Destaca, en algunos capítulos, la reflexión sobre la construcción social del riesgo de desastres, señalando que la vulnerabilidad y resiliencia de las comunidades no solo se definen por elementos físicos o naturales, sino también por decisiones políticas,

económicas y culturales. La incorporación de enfoques sociales y económicos en la evaluación de riesgos es esencial para el desarrollo de intervenciones más inclusivas y equitativas que atiendan las causas fundamentales de la vulnerabilidad.

Con un mensaje claro y un llamado a la acción, este libro invita a investigadores, responsables de la toma de decisiones y al público en general a profundizar en sus páginas, no solo como lectores, sino como agentes activos en la construcción de un futuro más seguro, sostenible y resiliente.

**Enrique Guevara Ortíz**

*Director General del CENAPRED*

## Presentación

La red de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos (REDESClim) del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología de México (CONAHCyT) ha desarrollado una estrategia de acceso universal del conocimiento que, a través de la edición de libros temáticos que permitan la divulgación y consulta libre de escritos sobre las líneas estratégicas que se cultivan en la REDESClim.

En el marco de las acciones desarrolladas por integrantes de la REDESClim se presenta una reflexión en la curva de aprendizaje de la gestión multidimensional del riesgo, cuyo fin, es promover el cumplimiento de las metas de la gestión integral del riesgo de desastre señaladas en el marco de Sendai.

Para ello, la Unidad de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Guerrero, citó del 11 al 13 de septiembre del 2023 en Taxco, a la sociedad civil, gestores locales y académicos a fin de atender la discusión de la gestión del riesgo, bajo una aproximación transversal que brindó la capacidad de comprender la necesidad de señalar la curva de aprendizaje en torno a la gestión de los desastres. Un mes después, el huracán Otis tocó tierra en Acapulco, con las consecuencias negativas ya conocidas.

Este libro pone de manifiesto el quehacer que debe de orientar a la REDESClim, en función de la necesidad de continuar trabajando en el monitoreo climático, la generación de datos, el análisis de fenómenos y los pronósticos que sirvan para el apoyo de políticas públicas orientadas a gestionar integralmente los riesgos.

Finalmente, se agradece a los coordinadores de la obra, pero sobre todo al comité editorial y a los autores de los doce capítulos aquí publicados por poner a disposición de la sociedad los conocimientos y saberes sobre la curva de aprendizaje en la gestión de riesgo de desastre.

Atentamente  
**Dr.-Ing. Oscar Frausto Martínez**  
*Representante*  
*REDESClim - CONAHCYT 2021 - 2023*



## Introducción

En el marco del plan de trabajo del Comité Técnico Académico de la Red de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos (REDESClim) del CONACHYT, se estableció el desarrollo de actividades científicas, tecnológicas y de innovación para el año 2023. La REDESCLIM celebró en la Universidad Autónoma de Guerrero - Escuela Superior de Ciencias de la Tierra - su reunión anual número once, donde el tema de discusión se centró en la curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo”, en el cual se presentaron trabajos académicos que constituyen una aportación interdisciplinar integral. La curva de aprendizaje es un concepto que se escucha y se lee, pero es poco utilizado en su amplia o restrictiva dimensión, en la búsqueda de la mejora de los procesos y resultados de la gestión. El enfoque de gestión de riesgo es un andamiaje estructurado que permite evaluar, analizar, entender y sistematizar un conjunto no homogéneo de elementos que sirven como elemento para la gestión ambiental en las escalas local y regional. La carencia de una política pública fundamentada en el conocimiento científico y tradicional, orientada al manejo integral del territorio se expresa intrínsecamente en la construcción del riesgo, y por ende en el incremento en la ocurrencia de desastres.

En el presente libro se analizan temas coyunturales, se discuten casos reales, se abordan temas desde una perspectiva holística y por lo tanto, es posible obtener una visión actual, organizada y puntual de la gestión de desastres.

En el primer capítulo, Rodríguez Esteves presenta, desde la política pública, un análisis de las lecciones aprendidas de las tormentas tropicales que afectaron al estado de Guerrero entre 2013 y 2022, para lo cual, se consideraron los instrumentos de políticas públicas estatales, los nuevos contextos de vulnerabilidad, así como las nuevas vetas de investigación a seguir para reducir el riesgo de desastres. Entre las conclusiones se destaca que los desastres asociados a este tipo de amenaza natural son recurrentes, lo que debe ser considerado como insumo para las políticas públicas orientadas hacia la reducción del riesgo hidrometeorológico en el estado.

En el segundo capítulo Bruno Trueba, David Romero y Christian Domínguez en su trabajo caracterizan y analizan espacio temporalmente, las velocidades de traslación de los ciclones tropicales durante el periodo 1949-2022 a partir de los datos de uso público. Las velocidades de traslación se representan en celdas hexagonales de tamaño  $3.25^\circ$  gracias a un muestreo homogéneo espacialmente de las trayectorias en la cuenca del Atlántico norte. Con este análisis pudieron conocer su variabilidad espacial y sus tendencias. Finalmente, entre sus resultados encontraron celdas con tendencias positivas y que son también estadísticamente significativas cerca de las costas del Caribe Mexicano, República Dominicana, Cuba, Trinidad y Tobago, Venezuela y en las costas de Carolina del Norte.

Para el tercer capítulo Antonio Luna y colaboradores validaron un modelo para estimar la precipitación en la región de estudio, la entidad federativa veracruzana, donde no se cuenta con puntos de medición climatológica. La metodología consistió en evaluar 11 modelos espaciales de interpolación para estimar la precipitación ocurrida durante el huracán Ingrid en el año 2013 sobre el estado de Veracruz que ocasionó inundaciones, deslaves, deslizamientos de tierra, entre otras afectaciones más. Por lo que se propone este modelo espacial para conocer la información en puntos donde no se cuenta con registros o cuando por algún motivo se pierde la información donde sí se mide. La información que generó al aplicar el modelo proporcionará el conocimiento científico para la agenda de los tomadores de decisiones en la prevención de desastres por fenómenos hidrometeorológicos, mismos que afectan a regiones donde actualmente no existe cobertura climatológica.

Los estudios de caso son herramientas que arrojan resultados valiosos cuando la metodología es sólida; en ese sentido, en el capítulo cuatro Christoph Neger y Francisco León explican sobre la utilización del Fire Weather Index, para determinar el riesgo de incendios relacionado con condiciones ambientales. En el presente trabajo se realiza una comparativa entre dicho índice en el periodo 2015-2020 y los registros de campo de incendios forestales en México de la Comisión Nacional Forestal. Para ello, empleando una aproximación basada en las diferencias normalizadas de ambos conjuntos de datos, se determinan las coincidencias y diferencias espaciales, y se analizan, desde una mirada multidisciplinar, las posibles causas de dichos patrones. Los autores discuten la adaptabilidad del Fire Weather Index para distintas regiones del país, así como la viabilidad de este tipo de índices para el diseño de escenarios del riesgo de incendios forestales en el futuro, y sus implicaciones para el manejo del fuego.

Existen eventos extremos que tienen un impacto directo en el sistema económico y social, uno de ellos es la contaminación por tormentas de polvo, en el capítulo cinco, Christian Álvarez, María de Jesús Guevara y Francisco León, nos presentan información respecto al impacto ambiental de las tormentas de polvo, el cual ha propiciado el grave deterioro de la calidad del aire en regiones urbanas del país. Los autores mencionan que el material articulado emitido durante estos episodios ha sido asociado por diversos estudios con el aumento de hospitalizaciones por problemas respiratorios en la población vulnerable. La investigación sobre las tormentas de polvo en México se concentran principalmente en el norte, sin embargo, la porción central del país ha sufrido, de forma cada vez más común, el impacto de estos fenómenos naturales. Los resultados de esta investigación describen un panorama de riesgo bajo episodios de emisión de polvo masiva que debe ser considerado para establecer nuevas metodologías de alerta y prevención para la ciudadanía con mayor potencial de ser afectada.

Un elemento fundamental en la gestión de los recursos hídricos es el suelo y su degradación; razón por la cual, en el capítulo sexto, Rivera García *et al*, mencionan

que en México se presentan vulnerabilidades altas ante las sequías, sobre todo en la región centro y norte del país; esta condición natural de falta de agua en conjunto con una mala gestión del recurso, provoca condiciones de escasez hídrica. Los autores explican que esta condición de escasez año con año se presenta con mayor frecuencia, provocando afectaciones sociales y económicas en la región; y al tratarse de un fenómeno multifactorial; para este estudio, se propone el empleo del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) con la finalidad de determinar las zonas de mayor vulnerabilidad ante la escasez hídrica, considerando aspectos ambientales y socioeconómicos que tienen influencia sobre el fenómeno. Finalmente concluyen que es necesario establecer planes y programas que consideren el recurso hídrico como factor prioritario, integrando aspectos sociales, económicos, ambientales y la demanda hídrica que estos sectores representan, a fin de conocer la disponibilidad hídrica actual y el futuro de las actividades económicas que se relacionan con dicho recurso.

El cambio climático es una amenaza real, los fenómenos hidrometeorológicos extremos son una amenaza local para sectores específicos; En el capítulo siete, Jiménez Martínez *et al*, realizaron un análisis del riesgo por inundación en la zona urbana del municipio de Tlaltenango, Zacatecas. Para la tormenta ocurrida el 20 de julio de 2008. Basado en la caracterización de la tormenta asociada, empleando parámetros geométricos y geomorfológicos de la cuenca, en el modelo hidrológico HEC-1 se determinó el hidrograma de escurrimiento. Se desarrolló el modelo hidráulico HEC-RAS del arroyo y zona urbana afectada integrando información topográfica a detalle, configuración de los puentes y alcantarillas, rugosidades, los usos y tipos de suelo. Los resultados numéricos de tirantes y extensión de inundación fueron mapeados para determinar la vulnerabilidad y grado de exposición a viviendas y comercios. Los mapas generados y el análisis de la vulnerabilidad han contribuido una mejor gestión del riesgo por inundación, generando un plan de contingencia municipal. En ese sentido la modelación hidráulica presenta una buena herramienta para la gestión del riesgo.

Nuestro planeta puede verse como un sistema cerrado y por lo tanto los recursos naturales son finitos. Es imposible detener el aprovechamiento de estos recursos, pero podemos hacerlo de forma más racional. Los residuos de la construcción también se asocian con los asentamientos humanos ya que se utilizan como relleno de los terrenos, tiene como resultado un deterioro en la imagen urbana y en el ambiente, además de las pérdidas económicas y de servicios ambientales. En el capítulo ocho, Ena Gámez *et al*, exponen una aproximación del riesgo social y ambiental, derivados de actividades antropogénicas y naturales, ante el fenómeno lluvia-escurrimiento en el municipio de Ensenada. Para lograr este objetivo se analizaron 152 tiraderos clandestinos en el municipio, con modelos de evaluación hidrológica para rellenos sanitarios, a partir de datos bibliográficos. Se emplearon datos de las características físicas de los tiraderos, datos climatológicos para el periodo 2008 a 2019, datos de cobertura vegetal, topografía y textura de suelo en capas

superficiales del suelo. Entre los resultados principales para la zona de un acuífero, ubicado en la delegación de Maneadero, se encontró la cantidad de 1,100 toneladas por año de lixiviados y el 7% de percolaciones en tres capas del subsuelo. La población en riesgo se encuentra en un radio de 500 metros alrededor de los tiraderos, correspondiente a 167,110 personas.

A escala global, los patrones estacionales de temperaturas y precipitaciones constituyen los factores principales para determinar la distribución de organismos en el espacio. Estudios recientes demuestran que el cambio climático modifica la distribución de las plagas y enfermedades tanto en el campo como en la salud humana y, por lo mismo, es difícil prever todos sus efectos. En el capítulo 9, Contreras, Galindo & Palacios analizan el vector del dengue, con los egresos hospitalarios y la variabilidad climática, en particular con los periodos de sequía. Como resultado de esta investigación, se establecieron los principales factores relacionados con el clima, que influyen en la proliferación, distribución y transmisión de la enfermedad del dengue en México, desde el año 2000 hasta el 2019. El estudio muestra que los casos de dengue han ido en aumento, concentrándose principalmente en los climas cálidos, aunque a partir del año de 2005, la distribución de la enfermedad se ha expandido hacia el norte del territorio nacional, particularmente, en climas secos (Bs), algo inusual históricamente. Los autores mencionan que es difícil prever la manera en que cambio climático en México afectará la distribución regional del dengue, tentativamente se puede concluir, que los fenómenos derivados del calentamiento global, como sequías, ciclones, precipitaciones y temperaturas de mayor intensidad, aumentarán la incidencia de la enfermedad en diferentes regiones del país, principalmente las zonas cálidas subhúmedas y en segundo lugar las semiáridas.

El cambio climático es considerado un fenómeno natural y cíclico, evento por el que nuestro planeta ha pasado en varias ocasiones. Sin embargo, investigaciones recientes muestran evidencia que el proceso ha modificado su tendencia natural acelerando su comportamiento. En el capítulo diez se propone un análisis de imágenes de satélite SENTINEL-5P, TROPOMI y el Modelado Espacial (ME) para la emisión de alertas tempranas como un instrumento de medición importante para determinar la normativa en este caso del CH<sub>4</sub> a fin de integrar un inventario transparente, comparable, consistente, exhaustivo y exacto, que permita a México informar sobre sus emisiones a la Conferencia de las Partes y a la Convención Marco de Cambio Climático, así como generar el protocolo que permita desarrollar e instrumentar programas y políticas eficaces de investigación, mitigación y adaptación frente al cambio climático. ODS Acción por el clima Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. Los autores concluyen que las medidas que se utilizan para lograr desarrollo sostenible que ofrece un medio ambiente que tiene sus servicios ecosistémicos intacto y maximizando el bienestar humano.

El registro y análisis de las dimensiones comunicacionales de las prácticas sociales de los referentes científicos entorno a las variables de riesgo climático, permite reconocer las practicas comunicacionales e identificar cuáles son los actores sociales que interpelaron o interpelan, a través de qué estrategias lo hicieron y lo hacen actualmente y qué concepciones de lo comunicacional se ponen en juego. En el capítulo once los autores evalúan la problemática que presenta la comunicación estratégica ante los eventos meteorológicos extremos, además de, la percepción desde los distintos actores sociales involucrados. Mediante un análisis cualitativo del escenario internacional y basado en la percepción social *in situ*, se observó que la comunicación es un problema grave en la cual se ha avanzado poco, tanto sobre los avisos y alertas como en la toma de las medidas adecuadas. En este contexto y haciendo hincapié sobre los hallazgos observados, se puede concluir que, para lograr una comunicación efectiva ante la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos, las reglas elementales es que deben ser claras, concisas, consistentes y con conocimiento.

Finalmente, para terminar este libro, los autores realizaron un análisis de los monumentos conmemorativos a desastres que se inscriben dentro de las acciones de remembranza posdesastre. Estos monumentos (placas, esculturas, testigos, plazas, parques, museos, fuentes y ceremonias) se promueven de manera individual o colectiva por las víctimas, directas o indirectas, así como por liderazgos autónomos o grupales. A través de la revisión de las acciones de memorialización de los huracanes Janet (Chetumal), Gilberto (Monterrey), Paulina (Acapulco), Wilma (Cancún) y Manuel (La Pintada - Guerrero) los autores analizaron la función de los memoriales como creación de espacios públicos (físico, jurídico, institucional, virtual, entre otros) que son propicios para tomar acciones con el fin de evitar que la tragedia conmemorada se repita.

Les invitamos a disfrutar esta obra de manera integral, pues cada uno de los capítulos contiene elementos que son motivo de reflexión, de un análisis profundo y que pueden ser parte de una base de conocimiento relativa a la gestión integral del riesgo mediante la curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Finalmente, este libro es resultado de la cooperación entre la REDESClim y la Universidad Autónoma de Guerrero, en especial, al trabajo de la Escuela Superior de Ciencias de la Tierra, quien promovió los apoyos institucionales para editar este manuscrito.

**Atentamente,  
Coordinadores de la obra**

Dr. Oscar Frausto Martínez  
Dra. Rosalva Pérez Gutiérrez  
Dr. Julio César Morales Hernández



# 1

## **Tormentas tropicales en Guerrero, México: lecciones aprendidas para las políticas públicas**

*Juan Manuel Rodríguez Esteves*

El Colegio de la Frontera Norte, Tijuana,  
México, [jesteves@colef.mx](mailto:jesteves@colef.mx),  
ORCID: 0000-0002-9022-9655

Rodríguez-Esteves, J.M. (2024). Tormentas tropicales en Guerrero, México: lecciones aprendidas para las políticas públicas. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales Hernández, J. C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim, México. Pp: 19 - 35.

### **Resumen:**

El estado de Guerrero, en la costa del Pacífico Mexicano, está expuesto a los impactos de eventos hidrometeorológicos extremos, para este caso los ciclones tropicales. En los últimos años, Guerrero ha experimentado eventos intensos como lo fue el huracán Pauline (1997) y la tormenta tropical Manuel (2013), por citar solo algunos, los cuales han demostrado que los daños asociados no solamente están relacionados con la intensidad del evento natural que los desencadenan, sino también con los contextos de vulnerabilidad social e institucional que la sociedad va acumulando con los años. En ambos casos, el puerto de Acapulco, Guerrero, sufrió las mayores pérdidas tanto en infraestructura (destrucción de carreteras, vías de abastecimiento, viviendas, etc.) como de vidas humanas.

El objetivo es analizar las lecciones aprendidas de las tormentas tropicales que afectaron al estado de Guerrero entre 2013 y 2022, para lo cual, se consideraron los instrumentos de políticas públicas estatales, los nuevos contextos de vulnerabilidad, así como las nuevas vetas de investigación a seguir para reducir el riesgo de desastres. Entre las conclusiones se destaca que los desastres asociados a este tipo de amenaza natural son recurrentes, lo que debe ser considerado como insumo para las políticas públicas orientadas hacia la reducción del riesgo hidrometeorológico en el estado.

Palabras clave: [Desastres](#), [huracanes](#), [políticas públicas](#)

Línea temática: [Políticas públicas y estrategias de comunicación](#)

## Introducción

El impacto de los fenómenos hidrometeorológicos en México es recurrente debido a dos factores principales: su ubicación entre el Mar Caribe, Golfo de México y Océano Pacífico, exponiendo sus costas a la influencia de ciclones tropicales, y, por otro lado, el crecimiento urbano acelerado en regiones costeras, lo que representa una mayor exposición de la población, condición que se acentúa cuando se desarrollan contextos de alta vulnerabilidad social frente a estas amenazas.

En materia de política pública, 1985 fue el parteaguas en materia de protección civil en México. Los efectos de los sismos de ese año en Ciudad de México obligaron al Estado mexicano a reorganizar la estructura federal para responder de manera más eficiente a la población afectada por una emergencia o desastre. Para el siguiente año, se crea el Sistema Nacional de Protección Civil (Sinaproc), una estructura organizacional y operativa para atender a la población en caso de desastre, no así para reducir el riesgo. En las décadas siguientes, tanto los estados como algunos municipios empezaron a crear sus propios instrumentos de política pública en esta materia al crear sistemas estatales de protección civil, legislaciones y atlas municipales de peligros, con lo que se busca proteger y atender a la población local, como es el caso del estado de Guerrero, México.

En este capítulo se presenta un análisis sobre las condiciones en materia de gestión del riesgo de desastres para el estado de Guerrero, México, a raíz del impacto de la tormenta tropical Manuel (13-20 de septiembre) y el huracán Ingrid (12-17 de septiembre) durante 2013. De manera particular, se presentan los principales avances en gestión del riesgo a nivel estatal, con la intención de explorar qué tanto se ha avanzado en la reducción del riesgo y proponer alternativas para que los desastres no sean recurrentes. Se concluye que, a pesar de los avances en la normatividad para la reducción del riesgo de desastres a nivel estatal, falta implementar mecanismos de aplicación a nivel local que reduzcan el riesgo y minimicen la vulnerabilidad ante los impactos de ciclones tropicales y otros fenómenos hidrometeorológicos.

## Marco de referencia

Los impactos de los fenómenos hidrometeorológicos en México provocan daños y pérdidas cada año. En 2021, se registraron \$15,333 millones en pérdidas por los efectos de los desastres, de los cuales el 90% estuvieron asociados a fenómenos hidrometeorológicos entre los que se encontraron lluvias, inundaciones, sequías y ciclones tropicales (Cenapred, 2022:2). Esta tendencia se mantiene a nivel mundial, para ese mismo año se produjeron 252 mil millones de dólares en pérdidas por desastres asociados a fenómenos naturales, de los cuales el 91% se relacionaron con sequías, temperaturas extremas, inundaciones y tormentas (EM-DAT, 2022:7). La ocurrencia de un fenómeno hidrometeorológico como

los anteriormente descritos, no necesariamente llegan a desencadenar un desastre. Para que ocurra un desastre, se requiere que se combine una amenaza, en este caso puede ser una lluvia o ciclón intenso, y una comunidad o sector de la sociedad vulnerable, que se puede ver afectada ante el impacto del fenómeno natural (Olivier-Smith, 2020:3-4).

Entre los antecedentes más recientes sobre el impacto de los fenómenos hidrometeorológicos en el estado de Guerrero se encuentra el huracán Pauline. En octubre de 1997, la depresión tropical 18-E desarrolló una tormenta tropical que posteriormente evolucionó a huracán, la trayectoria de Pauline fue paralela a la línea de costa de Guerrero, y en el puerto de Acapulco mantuvo rachas de viento de más de 200 km/h, con lluvias acumuladas durante dos días de más de 405 mm (Rodríguez, 2017:140-141). Entre los daños asociados a Pauline se encuentran 147 fallecimientos y 9,000 personas afectadas (ver tabla 1).

La historia se repetiría 16 años después, debido a la combinación de dos ciclones tropicales. En la costa del Pacífico se desarrolló Manuel, mientras que por el Golfo de México se presentó Ingrid, situación que no se había presentado desde muchos años atrás, coincidieron dos ciclones en una misma región (Rodríguez, 2017:142-143). En Guerrero, la combinación de estos dos fenómenos hidrometeorológicos, desde la visión dominante o tecnocrática, provocó 105 defunciones y daños en la infraestructura civil por más de 23 mil millones de pesos corrientes (ver Tabla1).

**Tabla 1. Pérdidas asociadas a fenómenos hidrometeorológicos en el estado de Guerrero.**

Año	Defunciones	Población afectada	Viviendas dañadas	Escuelas dañadas	Total de daños (mdp)	Fenómeno
1997	147	9,000	500	--	600	Huracán Pauline
2011	10	4,682	914	1	4.6	Lluvias e inundaciones
2012	10	71,713	906	14	220	Ciclón tropical Ernesto y Carlotta
2013	105	--	10,497	510	23,441	Ciclones tropicales Ingrid y Manuel
2014	1	14,268	1,396	0	63	Ciclón tropical Truddy
2015	3	26,809	715	4	40	Sequía y mar de fondo
2016	2	411,344	122	1	1,970	Lluvias intensas
2017	6	1,996	439	5	672	Ciclón tropical Max e inundaciones
2018	2	195	191	0	0.2	Huracán Bud y tormenta Carlotta
2019	0	616	2,850	23	791	Tormenta tropical Narda
2020	2	9,901	2,094	0	634	Ciclón tropical Hernán y lluvia intensa

**Fuente:** elaboración propia con información de Cenapred, 2001, 2013, 2014, 2021, 2021b, 2021c, 2021d, 2019, 2020, 2021e y 2021f.

Desde 1997 los impactos de los fenómenos hidrometeorológicos, y en particular las lluvias, inundaciones y huracanes, han provocado pérdidas como fallecimientos y daños a la infraestructura en el estado de Guerrero. Durante la década de 2010, la población afectada ha ido creciendo, resaltando los años 2012 a consecuencia de ciclones tropicales, en 2013 por Manuel e Ingrid, y más recientemente en 2016 por lluvias intensas. Afortunadamente, el número de personas fallecidas no parece tener un aumento significativo, sino por el contrario, tiende a disminuir, pero esto dependerá de la ocurrencia en cada año de fenómenos intensos en el territorio estatal y de la reducción de la vulnerabilidad social.

La magnitud de daños asociados a fenómenos hidrometeorológicos en Guerrero ha dependido de factores tanto físicos (ubicación de los asentamientos, intensidad de la amenaza, tiempo de afectación, etc.) como sociales (servicios públicos, información, preparación, atlas de riesgos, etc.) Sin embargo, los fenómenos hidrometeorológicos no afectan a la población de igual manera. Las condiciones sociales, asociadas a la vulnerabilidad, es un contexto que se debe considerar para evitar y atender los efectos negativos de los ciclones tropicales y otras amenazas de origen natural que desencadenan desastres. De manera general, un indicador de las carencias en que vive la población es la marginación, un fenómeno estructural que se origina en el patrón histórico de desarrollo, entendido como una falta de progreso y la exclusión de grupos sociales del proceso de desarrollo (Conapo, 2020:10).

La marginación es estudiada con base en variables asociadas a educación, vivienda, distribución de la población e ingresos por trabajo, lo que demuestra el grado de carencias que posee un grupo social en particular, siendo calculada a nivel estatal o municipal (Conapo, 2020:10-14). Para 2020, el estado de Guerrero mantuvo un índice de marginación muy alto y, de manera particular, el municipio de Acapulco mantuvo un grado de marginación bajo, Coyuca de Benítez alto, Técpan de Galeana medio, Zihuatanejo muy bajo y Petatlán medio, todos estos municipios se ubican en la zona costera del estado de Guerrero, región expuesta a los impactos de los ciclones tropicales y donde se concentran las declaraciones de emergencia, desastre y contingencia climatológica, como se verá más adelante.

El instrumento básico para la prevención de los desastres y, en cierta medida, la reducción del riesgo, son los atlas de riesgo municipales. Con base en el Atlas Nacional de Riesgos, coordinado por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), para mayo de 2023 sólo estaban integrados a esta plataforma los atlas de riesgos municipales de Zihuatanejo (2011), Acapulco (2021) y Chilpancingo (2022), tres municipios pertenecientes al estado de Guerrero. Esto significa que sólo el 4% de los 81 municipios en los que está dividido el estado cuentan con este instrumento integrado al nacional. La baja cobertura sólo fue superada por el estado de San Luis Potosí con el 3% (dos atlas municipales de un total de 58 municipios). Los atlas de riesgos municipales también pueden ser una

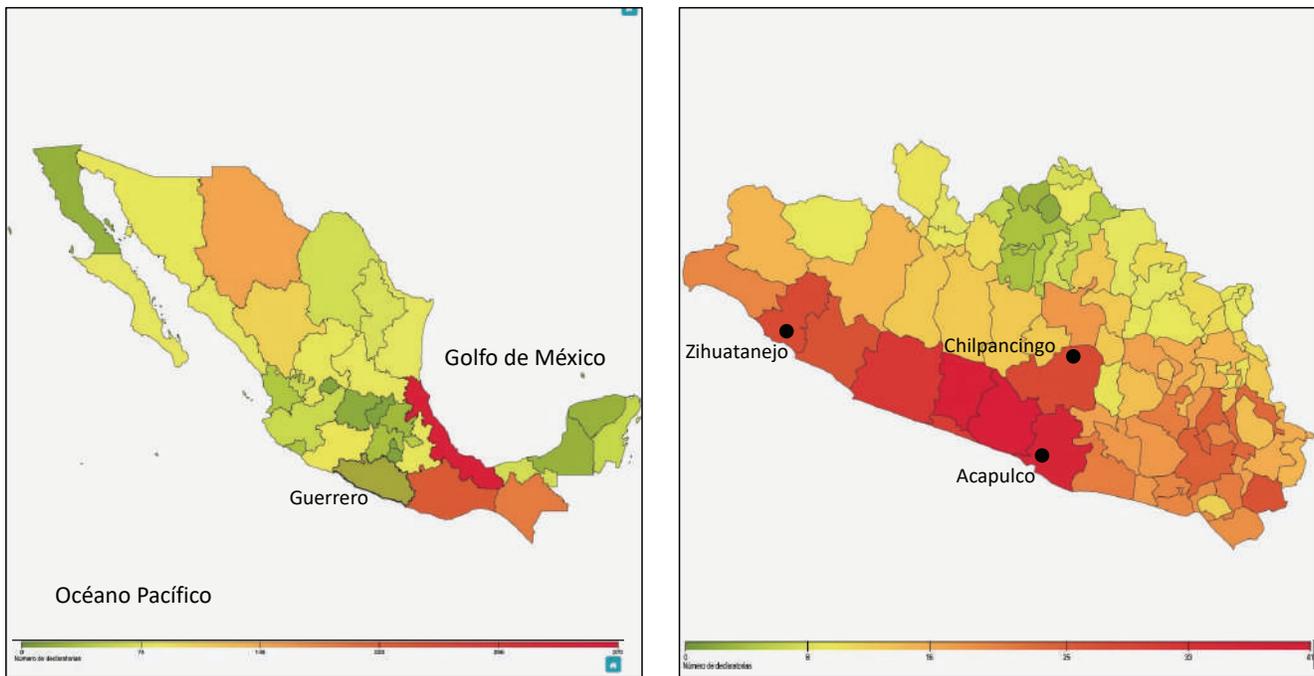
herramienta para que las autoridades locales sean la primera instancia de respuesta ante la eventualidad de una emergencia que se pueda transformar en un desastre (Cenapred, 2023). El que no exista este tipo de instrumentos, puede generar poca coordinación entre las dependencias gubernamentales tanto municipales como estatales, lo que podría aumentar el riesgo de desastre, en el entendido de que una sociedad organizada es menos vulnerable (Wilches-Chaux, 1993:28).

Para entender cómo una sociedad o comunidad puede hacer frente a las consecuencias de una amenaza natural, que en un contexto de cambio climático como el actual puede ser más intensa, se debe analizar el marco legal y normativo con el que se cuenta para entender los mecanismos de intervención en la reducción del riesgo. Esto cobra mayor relevancia cuando el territorio ha sido afectado por desastres de manera recurrente, como lo ha sido el estado de Guerrero.

## El contexto del análisis

Para esta investigación se realizó una búsqueda exhaustiva sobre los principales acontecimientos registrados, en dos dimensiones. Por un lado, los principales daños asociados a fenómenos hidrometeorológicos, y por otro, las iniciativas, nuevas o actualizadas, acerca de la reducción del riesgo de desastres. Para el primer caso, con base en información del Sistema de Consulta de Declaratorias por emergencia, desastres y contingencias climáticas, coordinado por el Cenapred, se obtuvo la Figura 1. Como se demuestra, son los municipios de la costa de Guerrero los que concentran el número de declaratorias debido, entre otros factores, a su exposición de los eventos hidrometeorológicos como tormentas tropicales, huracanes e inundaciones costeras. Otro elemento por destacar es que las corrientes fluviales que descienden de las montañas desembocan en estos municipios. Entre los municipios costeros con mayor número de declaratorias durante el periodo 2000 a 2021 se encuentran Coyuca de Benítez (56), Acapulco (37), Técpan de Galeana (32), Zihuatanejo (28) y Petatlán (26). Con base en esta información, las declaratorias para estos cinco municipios están asociadas a inundaciones, ciclones tropicales y lluvias intensas, amenazas de origen hidrometeorológico que afectan a una población vulnerable asentada en ciudades dedicadas a la actividad turística, como Acapulco y Zihuatanejo, lo que representa un gran desafío para el desarrollo económico, productivo y territorial del estado.

**Figura 1. Declaratorias por estado durante 2000-2023 y municipales para el estado de Guerrero.**

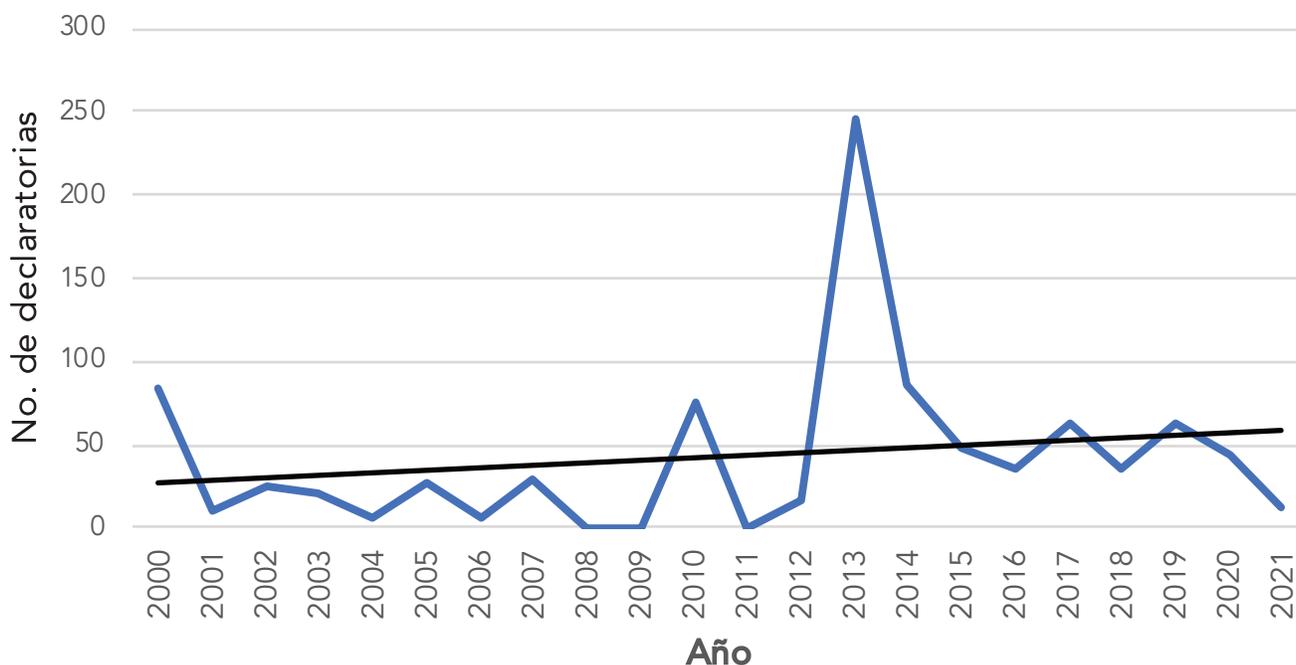


Fuente: tomado de Cenapred, 2023b, Sistema de Consulta de Declaratorias.  
Recuperado de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/#>

Para el periodo 2000 a 2021, fueron publicadas 1,226 declaratorias de emergencia, desastre o contingencia climatológica para el estado de Guerrero. Del total de declaratorias, 933 correspondieron a amenazas hidrometeorológicas (76%). La proporción de afectaciones de fenómenos hidrometeorológicos como lluvias, inundaciones, ciclones tropicales y sequías, respecto de otros fenómenos de origen natural como los geológicos, radica en la frecuencia de ocurrencia (Cenapred, 2021f). Las lluvias son eventos naturales que mantienen ciclones anuales, mientras que los sismos son más irregulares en un espacio determinado, por lo que se deben considerar los contextos locales y tipo de amenazas para una mejor política de reducción del riesgo.

La distribución anual de las declaratorias hidrometeorológicas para el estado de Guerrero se presentan en la Gráfica 1.

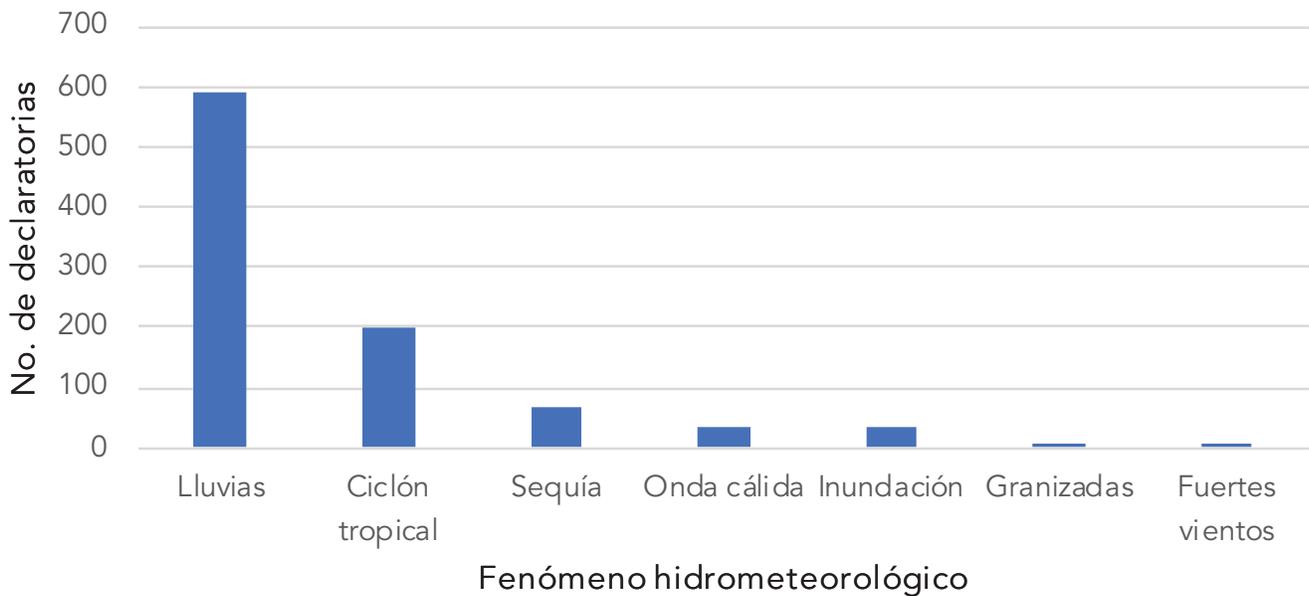
**Gráfica 1. Número de declaratorias por fenómenos hidrometeorológicos para el estado de Guerrero.**



Fuente: elaboración propia con información de Cenapred, 2023b, recuperado de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/>

Como se indica en la gráfica 1, se presenta un aumento en el número de declaratorias publicadas para el estado (línea oscura continua). De manera específica, destaca el año 2010, cuando se registraron daños asociados a lluvias e inundaciones que provocaron 18 fallecimientos y 5,745 viviendas dañadas (Cenapred, 2012:28). Por otro lado, 2013 estuvo determinado por la influencia de la tormenta tropical Manuel y el huracán Ingrid, mencionado anteriormente, provocando más de 100 fallecimientos y daños por más de 23 mil millones de pesos corrientes (ver Tabla1). Cabe mencionar que los años con mayor o menor número de declaratorias, depende de las afectaciones en las zonas más densamente pobladas y donde se concentre la actividad comercial, como es el caso de la actividad turística del estado de Guerrero.

Por lo que respecta al tipo de fenómeno hidrometeorológico, la gráfica 2 muestra la distribución de declaratorias para el periodo 2000 a 2021. De esta forma, son las lluvias la principal amenaza a la que está expuesta la población del estado, con casi 600 declaratorias. En segundo lugar, se encuentran los ciclones tropicales, que afectan principalmente a la población costera debido a los fuertes vientos, lluvias intensas, inundaciones y alto oleaje. En tercer lugar, se encuentran las sequías, las cuales demuestran la cara opuesta de los fenómenos hidrometeorológicos antes descritos.

**Gráfica2. Número de declaratorias según fenómeno hidrometeorológico para Guerrero (2000-2021).**

**Fuente:** elaboración propia con información de Cenapred (2023b), recuperado de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/>

En un segundo momento de esta investigación, se analizaron los instrumentos normativos asociados a la reducción del riesgo desde dos grandes campos. En primer lugar, se investigó en el Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guerrero (POG) las leyes publicadas en materia de protección civil, el atlas estatal, así como las principales instituciones relacionadas con la reducción del riesgo, búsqueda que puso en perspectiva la década de 1990 como punto de arranque para poner en contexto la evolución normativa en esta materia. En segundo lugar, se recuperó el desarrollo de la normatividad en materia de asentamientos urbanos, la cual está directamente relacionada con la planeación territorial enfocada con el desarrollo urbano, debido a que, en la mayoría de las veces, la población asentada en zonas de riesgo hidrometeorológico se ubica en áreas no aptas para el desarrollo urbano. Otro elemento que se consideró fue el alcance de la Ley de Cambio Climático, recientemente publicada, la cual está asociada al nuevo contexto climático en el que se presentan los fenómenos hidrometeorológicos y los escenarios de riesgo futuro. Las características de esta evolución se presentan en la siguiente sección.

## Lecciones aprendidas para la reducción del riesgo de desastres

De acuerdo con Knowles, citado por Ruiz (2023), “después de cada desastre (...) hay un lamento reiterado: tenemos que aprender de esta tragedia para que no vuelva a

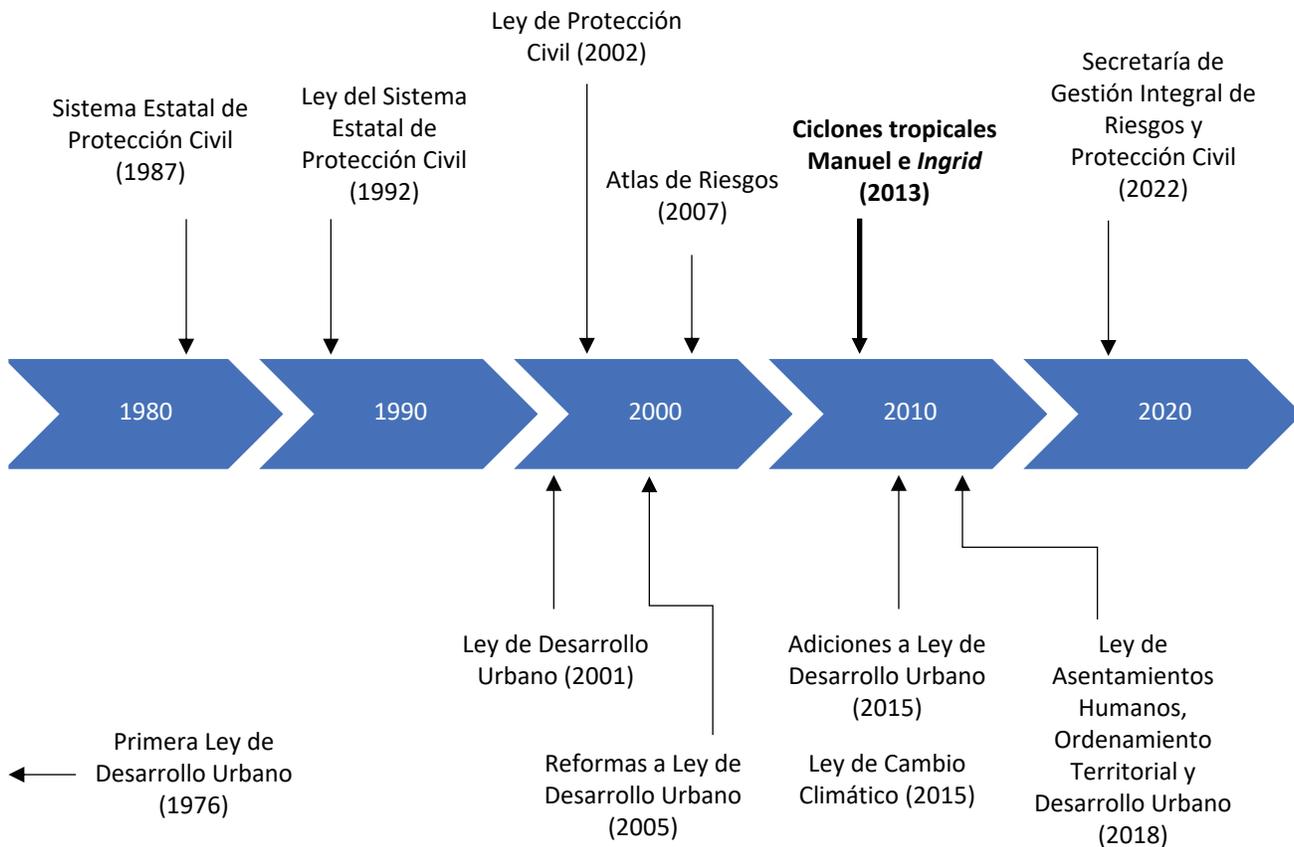
sucedan'. El hecho es que el récord histórico está lleno y disponible, y los desastres no suceden reiteradamente por pobreza de conocimiento. El olvido sobre los riesgos y los desastres no es un accidente" (Knowles, 2011, citado por Ruiz, 2023:2). Esta declaración involucra varios elementos que tocan diferentes dimensiones del riesgo. Por un lado, la memoria, que tal parece que conforme pasa el tiempo tendemos a "olvidar" lo que no hemos podido hacer como sociedad, nos involucramos en los problemas del día a día (en lo político, lo cotidiano, etc.) y se postergan las necesidades inmediatas que se deben atender para reducir el riesgo. Por otro lado, tendemos a minimizar los riesgos debido a una falsa confianza de que "a mí no me va a pasar", y más aún cuando la percepción del riesgo está asociada a temas de equidad social (Douglas, 1996:25). Sea como sea, parece ser que la historia se repetirá si no atendemos las causas subyacentes del riesgo (Oliver-Smith, *et al.*, 2016:37).

A diez años del paso de la tormenta Manuel en 2013 por las costas del Océano Pacífico, se han desarrollado instrumentos que podrían fortalecer las capacidades del Estado mexicano para atender y, sobre todo, reducir los contextos de vulnerabilidad ante fenómenos hidrometeorológicos. Uno de los antecedentes contemporáneos fue la publicación de la Ley General de Protección Civil un año antes (Presidencia de la República, 2012), que, por su carácter general, ha sido la base para las legislaciones estatales, la cual ha sido adaptada en diferentes momentos. Esta ley contempló en su momento la incorporación del término gestión integral del riesgo, que a la letra dice:

"El conjunto de acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos, considerándolos por su origen multifactorial y en un proceso permanente de construcción, que involucra a los tres niveles de gobierno, así como a los sectores de la sociedad, lo que facilita la realización de acciones dirigidas a la creación e implementación de políticas públicas, estrategias y procedimientos integrados al logro de pautas de desarrollo sostenible, que combatan las causas estructurales de los desastres y fortalezcan las capacidades de resiliencia o resistencia de la sociedad. Involucra las etapas de: identificación de los riesgos y/o su proceso de formación, previsión, prevención, mitigación, preparación, auxilio, recuperación y reconstrucción" (Art. 2, XXVIII).

De esta forma, se cuenta por primera vez con una definición amplia sobre la gestión del riesgo desde un enfoque multifactorial, destacando el principio de construcción del riesgo, el desarrollo sostenible y las causas estructurales, y no estructurales, del riesgo. Por su carácter general, los principios de esta ley deberán ser adaptados a las condiciones y marcos legales de cada entidad federativa y sus municipios, respetando su autonomía y su estructura orgánica. La normatividad para reducir el riesgo, y algunos otros instrumentos de política pública aplicables para el estado de Guerrero, se presentan en la figura 2.

**Figura 2. Principales instrumentos de política pública para la reducción del riesgo de desastres del estado de Guerrero.**



**Fuente:** elaboración propia con base en el POG (varios años).

En materia de protección civil, el primer antecedente aconteció en 1987, cuando fue promulgada la Ley del Sistema Estatal de Protección Civil, estructura organizacional que se desarrolló a nivel nacional después del desastre asociado a los sismos de 1985 que afectaron el centro del país, particularmente a la Ciudad de México. Cinco años después se aprobó la Ley del Sistema Estatal de Protección Civil (1992), la cual da instrumentos de coordinación entre dependencias estatales y municipales. Para inicios del nuevo milenio, fue publicada la primera Ley de Protección Civil (POG, 25/6/2002). En este momento, se incorporó a la protección civil, definiciones generales y poco precisas acerca del riesgo (como sinónimo de peligro o contingencia) y desastre (momento en un espacio con daños y afectaciones a la sociedad). Este fue el antecedente hacia un enfoque más integral del riesgo, tal y como se le considera en la actualidad.

Desde la perspectiva cronológica, la primera versión del atlas estatal de riesgos se dio en 2007, siendo un instrumento que pretendió ser la base para la planeación y gestión del

riesgo a nivel estatal, procurando la realización de atlas municipales para reducir el riesgo de la población ante una emergencia o desastre. Un ejemplo de esta evolución es el caso del municipio de Acapulco, el cual cuenta con un instrumento actualizado al 2021 (atlas) que define las localidades y Áreas Geoestadísticas Básicas (AGEBS) desagregados y su nivel de riesgo ante ciclones tropicales, que, en este caso de muy alto, con un valor de 4.5/5 (Ayuntamiento de Acapulco, 2021:149).

Un logro en materia de organización ocurrió en 2022. La Secretaría de Protección Civil se transformó en la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil, acuerdo que se publicó en el POG (11 de noviembre de 2022). Con esta modificación, se buscó complementar el enfoque de la protección civil (salvaguarda de las personas y sus propiedades), incorporando algunos elementos y procesos asociados a la gestión integral del riesgo de desastres, con lo cual se busca una mejor preparación para enfrentar los impactos de los fenómenos naturales y tecnológicos intensos. En el contexto de la gestión integral del riesgo, también se busca la reducción de la vulnerabilidad, fomentar la cultura de reducción del riesgo y fomentar la corresponsabilidad, y un elemento que destaca es la transferencia de riesgo, además de las que ya considera dentro del contexto de la protección civil (alertamiento, protección, seguridad, atención, etc.)

Por otro lado, la normatividad en materia de desarrollo urbano, como materia esencial para reducir la exposición de la población a los fenómenos hidrometeorológicos extremos (asociados al uso del suelo, crecimiento urbano en zonas de alto riesgo por inundación, etc.), tiene sus inicios en 1976, cuando se promulga la primera Ley de Desarrollo Urbano (POG, 26/09/1976). Las reformas y adiciones de este marco legal se dieron ya entrada la década de 2000, incluyendo el término de prevención de desastres urbanos que, aunque de manera general, pretendió incluir en el desarrollo urbano elementos de protección de la sociedad. Posteriormente, las actualizaciones de 2005 y 2015, vienen a complementar la parte de coordinación entre autoridades y sobre la responsabilidad de las autoridades municipales, en coordinación con el estado, en materia de usos del suelo, autorizaciones de construcción, entre otras responsabilidades en materia de centros históricos.

Para 2018 se estableció una visión más amplia en materia de desarrollo urbano, la Ley de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano, ya que se contemplan en la nueva normatividad aspectos como un nuevo capítulo relativo a la prevención de riesgos en los asentamientos humanos y de la resiliencia de las ciudades (Título Sexto, Artículos 92 al 97). Además, se incluyeron términos más completos como gestión integral de riesgos, reducción de riesgos de desastres y resiliencia. Esto viene a complementar las leyes de protección civil ya descritas arriba.

La legislación estatal en materia de protección civil debe evolucionar a una de reducción del riesgo, esto implica no solamente atender el desastre, lo que es importante, pero también en

disminuir los contextos de vulnerabilidad, que se puede traducir en asentamientos humanos menos expuestos a los efectos de los fenómenos hidrometeorológicos. De igual modo, un concepto central es la resiliencia hacia los fenómenos hidrometeorológicos. La resiliencia:

“Es la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad potencialmente expuesta a un peligro para resistir, asimilar, adaptarse y recuperarse de sus efectos en un corto plazo y de manera eficiente, a través de la preservación y restauración de sus estructuras básicas y funcionales, logrando una mejor protección futura y mejorando las medidas de reducción de riesgos” (Presidencia de la República, 2012:6).

Sin embargo, y de acuerdo con Macías (2015), el término resiliencia “desafía la coherencia del desarrollo de la sociedad hacia un rumbo de progreso, donde los desastres serían una posibilidad muy remota” (Macías, 2015:321). Por lo tanto, se debe tener cuidado, ya que esta noción no abarca las estructuras profundas que generan contextos de injusticia, muchas veces relacionados con la generación de contextos de vulnerabilidad global (Wilches-Chaux, 1993:22).

Con lo aquí expuesto, se permite comprender que los impactos de los fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en el estado de Guerrero son recurrentes, ya sea por la intensidad de las lluvias, inundaciones o ciclones tropicales, o por los contextos de vulnerabilidad que mucho tienen que ver con los índices de marginación a nivel municipal. La legislación en materia de protección civil estatal, que tiene relación con la ley general, pretende avanzar hacia un enfoque más amplio de lo que es la protección de las personas en momentos de emergencia o desastre, pero debe estar alineada con otros marcos legales como la ley de asentamientos humanos, ordenamiento territorial y desarrollo urbano, sin olvidar la ley de cambio climático. El tema de riesgo, y más aún, la reducción del riesgo, debe ser un tema transversal entre esas políticas y otras que, de alguna forma, están relacionadas con el bienestar de la población y la protección de los recursos naturales. El abordar al territorio, con su fuerte carga social que lo modela, debe estar en las agendas de todas las dependencias encargadas de la administración de los municipios y del estado, ya que la manifestación del riesgo cobra relevancia al momento en que se manifiesta el desastre.

Los efectos de los desastres pueden manifestarse mucho tiempo después. El paso de una tormenta intensa o un ciclón tropical frecuentemente genera destrucción de vivienda e infraestructura, dando paso después a los procesos de reconstrucción y reubicación. Para el caso de Guerrero, y en particular su capital, Chilpancingo, se desarrolló el fraccionamiento Nuevo Mirador, que pretendió dotar de vivienda a más de 5,000 personas afectadas por Manuel e Ingrid, sin embargo, su ubicación fuera de la ciudad generó déficits de infraestructura como caminos, transporte, agua potable, entre otros (Aviña, Milián y Guevara, 2018:39). Pero las consecuencias pueden ir más allá al trastocar

el arreglo social de una comunidad previa al impacto de una amenaza natural, ya que “las consecuencias sociales más importantes de las [re] ubicaciones son la transformación de las dinámicas productivas y laborales, la desarticulación de redes sociales y el traslado de un grupo social a una zona también de riesgo donde lo que cambia es la amenaza (Briones, 2010:143). Esto es solo un caso de muchos que se pueden documentar en todo el país, por lo que se debe cambiar el enfoque de, una vez ocurrido el desastre, se deben desarrollar asentamientos más seguros y con todos los servicios, aumentando así la resiliencia ante fenómenos hidrometeorológicos.

## Comentarios finales

Esta investigación abordó el desafío que representa aprender de las experiencias pasadas sobre los efectos de los desastres y cómo se pueden minimizar en el futuro. La recurrencia de desastres en una región debe ser indicativo de que los contextos de vulnerabilidad hacia una amenaza en particular siguen vigentes, y en el peor de los casos, van en aumento. La zona de estudio ha experimentado los efectos de fenómenos hidrometeorológicos intensos, lo que pone en alerta a las autoridades encargadas de reducir la exposición de la población a estas amenazas y, en consecuencia, reducir el riesgo de desastres.

Para el periodo analizado, resalta que solo tres municipios, dos costeros (Acapulco y Zihuatanejo) y uno interior (Chilpancingo), concentran el número de declaratorias de emergencia o desastre, presentan grados bajos o muy bajos de marginación y cuentan con un atlas municipal de riesgos actualizado, lo que los hace relativamente preparados para reducir el riesgo. Sin embargo, son estos municipios los más desarrollados al concentrar la población y las actividades productivas (por ejemplo, Acapulco), pero aún quedan pendientes municipios menos desarrollados para atender tanto las deficiencias en salud, educación y vivienda, así como contar con un atlas municipal de riesgos actualizado, por lo que deben quedar en la agenda política de corto plazo.

El estado de Guerrero experimenta los efectos negativos de los eventos hidrometeorológicos de manera recurrente, razón por la cual debe atender los rezagos que se manifiestan en los altos grados de marginación y actualizar los atlas municipales de riesgo, para reducir así el número de declaratorias por emergencia y desastres. La evolución de la política estatal ha seguido las etapas de la política nacional, confirmando así un sistema vertical de atención al desastre, pero aún no al riesgo.

El año 2013 fue el parteaguas para la política de atención y prevención del riesgo, ya que el término de riesgo fue incorporado a otras legislaciones como la ley de desarrollo urbano (2015), cambio climático (2015), asentamientos humanos (2018), y un cambio significativo

en cómo debe ser considerado el riesgo a través de la Secretaría de Gestión Integral de Riesgos y Protección Civil (2022). Esta secretaría representa una visión actualizada para atender los contextos previos del riesgo, para así reducir los contextos de desastres, ya sea asociado a lluvias o a ciclones tropicales, las amenazas más recurrentes en el estado. Sin embargo, la reducción del riesgo debe ser un tema no solamente atendido por esta secretaría, sino que debe ser atendido como un tema transversal al resto de las instancias encargadas de la planeación territorial.

Finalmente, y a manera de recomendaciones, se debe cambiar el enfoque de atención al desastre (enfoque de la protección civil) al de atención del riesgo, lo que implica reducir las causas subyacentes del riesgo. Lo anterior no es sencillo, toda vez que en la actualidad la respuesta de las instituciones es de tipo reactivo, lo que no abona mucho en reducir los grados de exposición. Del mismo modo, las instancias de protección civil solo deben ser las encargadas de coordinar los esfuerzos por reducir el riesgo y atender las emergencias, puesto que existen instituciones responsables, tanto funcional como legalmente, para regular los temas de usos de suelo, reglamentos de construcción, crecimiento urbano, desarrollo social, entre otras áreas.

Para nuevas investigaciones, se debe profundizar en las causas subyacentes del riesgo, por ejemplo, ampliar estudio de las medidas estructurales y no estructurales del riesgo. Las primeras son aquellas que tienen que ver con la infraestructura, obras como drenaje pluvial, muros de contención, puentes, etc., necesarios para protección de las personas y sus propiedades. Por otro lado, las medidas no estructurales están asociadas a la aplicación de los criterios y recomendaciones de los atlas de riesgo, tanto estatal como municipales, aplicar la normatividad urbana y territorial, pero, sobre todo, el involucramiento de la sociedad local para una mejor comprensión de su territorio, aportando conocimientos y su percepción acerca del riesgo. Esto último es un insumo importante, ya que la población expuesta debe contar con información confiable para el desarrollo de estrategias adaptativas que reduzcan los daños tanto en sus personas como en sus bienes.

## Referencias bibliográficas

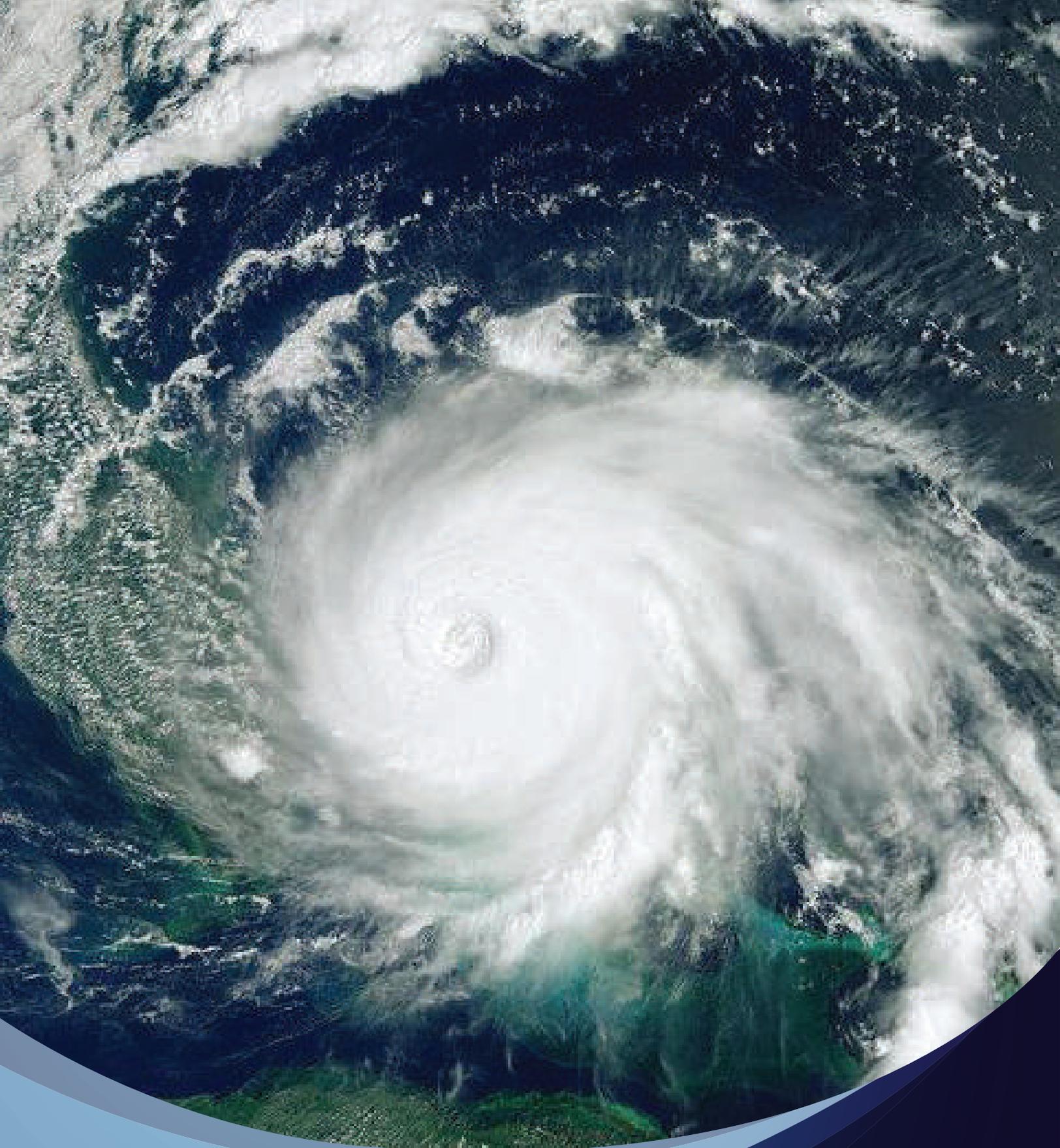
- Ayuntamiento de Acapulco (2021). Actualización del Atlas de Riesgos del Municipio de Acapulco de Juárez. Ayuntamiento Constitucional de Acapulco de Juárez, Guerrero.
- Aviña, N., Milián, G. y Guevara, M. (2018). Otra respuesta frente a los desastres. Huracán Ingrid y tormenta tropical Manuel, Chilpancingo, Guerrero, México. *Espacio y Desarrollo*, no. 32, pp. 29-54. <https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201802.002>

- Briones, F. (2010). Inundados, reubicados y olvidados: traslado del riesgo de desastres en Motozintla, Chiapas. *Revista de Ingeniería, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia*, enero-junio de 2010, pp,132-144.
- Cenapred (2001). Características del impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en el periodo 1980-99. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2012). Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2010. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2013). Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2011. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2014). Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en el año 2012. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2019). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2017. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2020). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2018. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2021). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2013. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2021b). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2014. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2021c). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2015. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2021d). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana en 2016. Centro Nacional de Prevención de Desastres.

Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)

- Cenapred (2021e). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en 2019. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2021f). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en 2020. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2022). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México en 2021. Centro Nacional de Prevención de Desastres. Recuperado de [https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar\\_buscaSubcategoria.action](https://www.cenapred.unam.mx/PublicacionesWebGobMX/buscar_buscaSubcategoria.action)
- Cenapred (2023). Atlas Nacional de Riesgos. Recuperado de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-municipales.html>
- Cenapred (2023b). Sistema de Consulta de Declaratorias 2000-2023. Recuperado de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/>
- Conapo (2020). Índices de marginación 2020. Ciudad de México. Secretaría de Gobernación, Consejo Nacional de Población.
- Douglas, M. (1996). La aceptabilidad del riesgo según las ciencias sociales. Barcelona. Paidós.
- EM-DAT (2022). 2021 Disasters in numbers. Emergency Event Database, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, USAID. Recuperado de: <https://www.emdat.be/publications>
- Macías, J. (2015). Crítica a la noción de resiliencia en el campo de estudios de desastres. *Revista Geográfica Venezolana*, vol. 56(2), pp. 309-325.
- Oliver-Smith, A., Alcántar-Ayala, I., Burton, I. y Lavell, A. (2016). Investigación forense de desastres (Forin): un marco conceptual y guía para la investigación. Ciudad de México. Integrated Research on Disaster Risk/Instituto de Geografía, UNAM.
- Oliver-Smith, A. (2020). Hurricanes, climate change and the social construction of risk. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*. March 2020, vol. 38, no. 1, pp. 1-12.
- Presidencia de la República (2012). Ley General de Protección Civil. Gobierno de México, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 6 de junio de 2012.
- POG (varias fechas). Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guerrero. Puede consultarse en <https://periodicooficial.guerrero.gob.mx/>
- Rodríguez, J. M. (2017). Los desastres recurrentes en México: El huracán Pauline y la tormenta Manuel en Acapulco, Guerrero. *Anuario Electrónico de Estudios en Comunicación Social "Disertaciones"*, 10(2), 133-152. Doi: <http://dx.doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/disertaciones/a.4778>

- Ruiz, N. (2023). Ciudad de México: reflexiones a cinco años. Otros diálogos de El Colegio de México. Núm. 20. Recuperado de <https://otrosdialogos.colmex.mx/ciudad-de-mexico-reflexiones-a-cinco-anos-del-19s>
- Wilches-Chaux, G. (1993). La vulnerabilidad global. En Maskrey, A. Los desastres no son naturales. Bogotá. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, p. 11-44.



Copyright:  
contains modified Copernicus Sentinel data (2019), processed by ESA

This Copernicus Sentinel-3 image features Hurricane Dorian as it pummels the Bahamas on 2 September 2019 at 15:16 GMT (11:16 EDT). This mighty storm has been parked over the northwest Bahamas for more than 24 hours unleashing a siege of devastation. Storm surges, wind and rain have claimed at least five lives and destroyed homes and infrastructure. Dorian is reported to be one of the most powerful Atlantic hurricanes on record. Residents in Florida, US, are also starting to feel the effects of Dorian, though its path is difficult to predict as it creeps slowly over the Bahamas.

However, the US National Hurricane Center expect life-threatening storm surges along Florida's east coast and along the coasts of Georgia and South Carolina. As the US authorities respond to the devastation, Europe's Copernicus Emergency Mapping Service has been activated to provide flood maps based on satellite data.

# 2

## **Caracterización de las velocidades de traslación de los ciclones tropicales del Atlántico Norte**

*Trueba Cruz, Bruno*

Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Mérida, UNAM, Ucu, Yucatán, México, 316022657@enesmerida.unam.mx, ORCID: 0009-0001-1121-5862

*Romero, David*

Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Mérida, UNAM, Ucu, Yucatán, México, dromero@enesmerida.unam.mx, ORCID: 0000-0002-1722-7514

*Domínguez Sarmiento, Christian*

Instituto de Ciencias del Atmósfera y Cambio Climático, UNAM, Ciudad de México, dosach@atmosfera.unam.mx, ORCID: 0000-0002-2787-052X

Citar este capítulo: Trueba Cruz, B.; Romero, D. y Domínguez Sarmiento, C. (2024) Caracterización de las velocidades de traslación de los ciclones tropicales del Atlántico Norte. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales Hernández, J.C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim, México. Pp: 37 - 51.

### **Resumen:**

Las velocidades de traslación son una variable fundamental de los ciclones tropicales. Las bajas velocidades aumentan los tiempos en los que los sistemas permanecen en un mismo lugar y se vinculan particularmente con importantes pérdidas económicas y/o humanas, como lo fueron los casos de Wilma en el norte de Quintana Roo, México, en el año 2005, y Dorian en las Bahamas, en el año 2019. Durante los últimos años, se ha observado que las velocidades de traslación están disminuyendo a escala global y en la cuenca del Atlántico en particular. Este estudio caracteriza y analiza espacio temporalmente las velocidades de traslación de los ciclones tropicales durante el periodo 1949-2022 a partir de los datos de uso público. Las velocidades de traslación se representan en celdas hexagonales de tamaño  $3.25^\circ$  gracias a un muestreo homogéneo especialmente de las trayectorias en la cuenca del Atlántico norte. Esto permitió conocer su variabilidad espacial y sus tendencias.

El análisis multivariado relaciona las velocidades de traslación con una interacción entre la frecuencia de Coriolis, la velocidad de los vientos sostenidos, la temperatura del mar y diversos factores atmosféricos como la cizalladura vertical del viento y el flujo direccional. El análisis temporal muestra que las tendencias, calculadas con los métodos de Mann-Kendall y Spearman a partir del promedio anual de cada celda, en su mayor parte, no son significativas. En cuanto a las celdas que tienen tendencias estadísticamente significativas, se relacionan mayormente con valores negativos y se ubican en el centro-este del Atlántico. Por el contrario, se encontraron celdas con tendencias positivas y que son también estadísticamente significativas cerca de las costas del Caribe Mexicano, República Dominicana, Cuba, Trinidad y Tobago, Venezuela y en las costas de Carolina del Norte particularmente.

Palabras clave: Huracanes, tiempo de residencia, circulación, IBTrACS

Línea temática: Modelación climática y análisis de procesos físicos

© 2023 REDESClim - Universidad Autónoma de Guerrero

## Introducción

Todos los años se puede observar la formación, evolución y afectación de los ciclones tropicales (CT) en las costas del Atlántico Norte (AN), debido a las condiciones ciclogénicas presentes en la cuenca. Según Chemke *et al.* [1], el AN ha experimentado un incremento en la temperatura superficial del mar (TSM) lo cual ha generado condiciones más cálidas a lo largo del tiempo. Como resultado, la frecuencia, intensidad y duración de los CT que impactan en las costas se han vuelto recurrentes en las últimas décadas (1944 - 2004) [2]. Webster *et al.* [3] destacan que la longevidad e intensidad de los CT están relacionadas con el incremento de la TSM, lo que indica una tendencia positiva en la frecuencia de estos sistemas en la región y, eventualmente de los tiempos de residencia. Por su parte, Domínguez *et al.* [4] encontraron que la TSM se elevará más de 2°C para finales de este siglo bajo el escenario de emisiones más catastrófico que supone que los gases de efecto invernadero incrementasen el forzamiento radiactivo a 8.5 W·m<sup>-2</sup> para 2010. Por lo tanto, es de suma importancia detectar las tendencias en las características de los CT (intensidad, longevidad, precipitación, velocidad de traslación, tamaño, etc.), para mitigar el riesgo que pueden representar para las comunidades costeras de la cuenca del AN. El estudio de las Velocidad de Traslación (VT) no es muy común, en general se analiza para cada sistema [5,6]. Por su parte, Kossin [7] estudió la variación de las VT para el mundo entero usando cada cuenca oceánica como unidad de muestreo.

Los huracanes con VT lenta tienden a ocasionar mayores costos en daños en comparación con aquellos que se desplazan más rápidamente. Un ejemplo de ello es el huracán Wilma, que impactó las costas del Caribe Mexicano en octubre de 2005. Wilma es el huracán más poderoso registrado en el AN y tuvo una duración de 10 días, siendo el fenómeno

hidrometeorológico más costoso que ha ocurrido en la zona [8], con un costo de \$6,938 millones de dólares en México [9]. Los vientos de Wilma alcanzaron los  $241 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  [8] y se desplazaba en dirección noroeste, con una VT lenta en Quintana Roo, su VT en la zona fue de  $1 \text{ a } 7 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  durante 33 horas (21-23 de octubre). El caso del huracán Dorian fue similar, estuvo estacionado durante 36 horas sobre las Bahamas con vientos sostenidos que superaron los  $300 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  y una VT promedio  $< 6 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ , provocando a su paso elevados costos con un total de \$3,604 millones de dólares en el archipiélago [9].

Las VT son fundamentales para conocer y evaluar el riesgo que presenta el impacto de los CT en zonas costeras con asentamientos humanos, puertos de relevancia económica, infraestructura en ciudades y ecosistemas de la región, ya que se ha observado una tendencia global de desaceleración en las VT, con un incremento del 10% de la actividad ciclónica a lo largo de 68 años en el periodo 1949-2016, debido a un aumento de  $0.5^\circ\text{C}$  en la temperatura global [7]. Este calentamiento debilita la circulación tropical de verano, lo que conlleva a disminuciones en las VT, lo cual afecta a la cuenca del AN, generando una mayor actividad anticiclónica con caídas divergentes de bajo nivel [10]. Esto se ha reflejado en una reducción del 16% en las VT de los CT dentro de la cuenca [7]. Es interesante mencionar que la VT está anticorrelacionada con la precipitación de los CT en el AN; es decir, los CT con VT lentas tienden a registrar una mayor precipitación sobre la región donde se estacionan, principalmente en el Golfo de México y Mar Caribe. Este tipo de CT tienen una peligrosidad mayor que los CT que tienen VT rápidas y que no producen grandes cantidades de precipitación sobre tierra [11].

La influencia de las variables físicas sobre las VT de los CT como la TSM, la Cortante Vertical del Viento (CVV) y el Flujo direccional de la Atmósfera (FD) es crítica para entender a las VT y su comportamiento. La TSM, es una variable fundamental para lograr comprender y predecir el comportamiento de los fenómenos hidrometeorológicos. Según estudios realizados, los niveles de TSM han experimentado un incremento de  $0.13^\circ\text{C}$  en el período de 1973 a 1989 [12] y existe una relación entre la TSM y las VT, pues los CT con velocidades de traslación más bajas tienden a ser más intensos en comparación con aquellos que presentan velocidades más altas, siempre y cuando las VT se mantengan dentro de un rango mínimo [13]. En cuanto al FD, genera cambios en las VT a manera local y en función de la latitud [14].

## Metodología

### Base de datos y zona de muestreo

El área de estudio se determinó en función de las ocurrencias y trayectorias de los CT en la cuenca del AN. Se utilizaron los registros históricos de la base de datos *International Best Track Archive for Climate Stewardship* (IBTrACS) [15,16] proporcionados por NCEI,

NOAA. Se consideraron eventos ocurridos desde 1949 hasta 2022, en función de que la base de datos se considera confiable para el AN a partir de 1948 debido a la mayor cantidad de muestreos realizados por aviones de caza huracanes no obstante la ubicación y la intensidad de los CT se han considerado más precisas desde 1970 gracias a las observaciones satelitales [17]. Algunas tormentas aún se pueden pasar por alto, y sus intensidades pueden ser bajas durante la era anterior a los satélites (1948-1969), especialmente los CT débiles cuya vida útil es de hasta 2 días [18]. La base de datos contiene información como el nombre del CT, año, mes, día, hora, velocidad de vientos sostenidos, latitud, longitud y distancia a la tierra. La VT se calculó utilizando posiciones vecinas a lo largo de cada trayectoria de los CT, monitoreando su ubicación cada 3 horas durante su tiempo de vida. La ubicación geográfica tiene una resolución espacial de  $0.1^\circ$  y la velocidad máxima del viento registrada se encuentra en nudo.

## Datos atmosféricos y oceanográficos

Los datos de la TSM se obtuvieron de la base de datos oisst-avhrr-v2r01 (*Optimate Interpretation NOAA*) [19]. Los datos atmosféricos se extrajeron del reanálisis NCEP-DOE, el cual contiene 80 variables diferentes en 17 niveles de presión en mallas con una resolución espacial de  $2.5^\circ$  desde 1979 hasta 2023. Para la CVV, se calcularon a partir de los vectores de velocidad del viento  $u$  y  $v$  a alturas de 200 a 850 hPa. Los datos de viento, para calcular el flujo de dirección, se promediaron las velocidades de flujo en alturas de 850, 600 y 400 hPa. Para evaluar estas variables físicas en las celdas de muestreo de  $3.25^\circ$ , se re-muestrearon previamente utilizando el método binomial a una resolución espacial de  $1^\circ$ .

## Análisis espacial

Se crearon archivos lineales a partir de la base de datos IBTrACS, seleccionando polilíneas con velocidades de vientos sostenidos  $\geq 35$  kt ( $18 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Cada CT se muestreó utilizando una malla de celdas hexagonales [20] con un tamaño de  $3.25^\circ$ . Esta malla hexagonal se generó automáticamente en el lenguaje de programación R, [21] por la extensión del área de interés ( $0-180^\circ$  W,  $10-80^\circ$  N) y se utilizó la paquetería *sf* [22]. Anualmente, para cada celda, se calculó la VT promedio de los CT.

## Análisis de tendencias

En primer lugar, se calcularon las tendencias de los valores promedios anuales de cada temporada para las VT, así como para las variables físicas usando el método de Mann

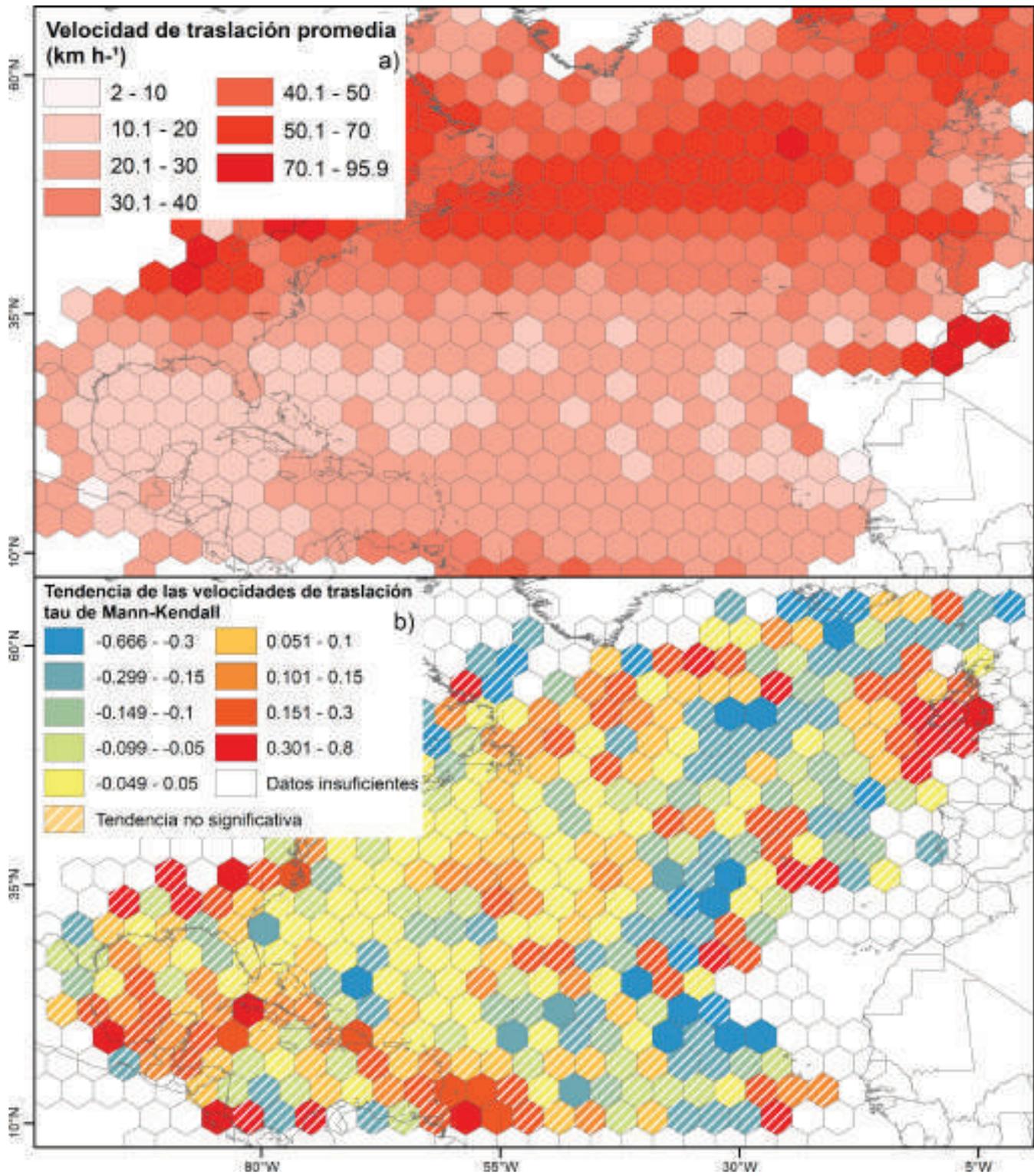
Kendall [23] en R. Para descartar tendencias artificiales, calculamos el intervalo de confianza del 90 % con el paquete NSM3 [24] y evaluamos los coeficientes de la prueba de tendencia gracias a su valor  $p$ . Solo se retuvieron las tendencias con intervalos de confianza que no cruzan el 0 y con valores de  $p < 0.1$ . Posteriormente, se realizó un análisis multivariado de un modelo lineal con regresiones utilizando el lenguaje R para relacionar las VT con las variables físicas correspondientes.

## Resultados y discusión

Se identificaron zonas en las que se observan VT bajas ( $< 10 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ ) en el Golfo de México (sur de Texas - EUA, Veracruz, Tamaulipas y Campeche - México), El Caribe occidental (Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá) (Figura 1a) y zonas, en latitudes medias, donde las VT son mayores. Los valores promedio de VT van incrementándose hacia el Norte de Luisiana - EUA a la Península de Labrador donde alcanzan hasta  $50 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ . Los valores más altos,  $\geq 70.1 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  se ubican en zonas continentales. Por otra parte, los estados de Florida, Carolina del Norte, Carolina del Sur, así como el Caribe oriental presentan valores de VT entre  $10.1$  y  $20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ .

En su mayoría, las tendencias de las VT dentro de la cuenca no mostraron valores de aumento en las velocidades, dando lugar a 8 celdas de valor significativo que tocan tierra. De estas, solamente la zona de Florida y Georgia, EUA, tienen un valor descendente en sus VT (Figura 1b). De hecho, este hexágono es mayormente marino. Sin embargo, se observaron algunas zonas donde las velocidades tienden a ser más bajas, como en la costa este de Florida y Georgia, EUA, al noreste de las Islas Turcas y Caicos, al suroeste de las Islas Azores. Además, se identificaron dos zonas de baja velocidad en el sur de Islandia y en las Islas de Cabo Verde. Es importante destacar que la ocurrencia de estos fenómenos en estas regiones no es frecuente. Por otro lado, se encontraron zonas significativas donde las VT tendieron a incrementar, como el norte de Veracruz - México, noroeste de Cuba y sobre República Dominicana. El resto de las celdas que presentan significancia, se encuentran en la región oceánica de la cuenca, alejadas de zonas habitadas.

**Figura 1.** Mapa de velocidad de traslación promedio (a) y tendencias de las velocidades de traslación de los CT (b) para el periodo de 1949 a 2022.



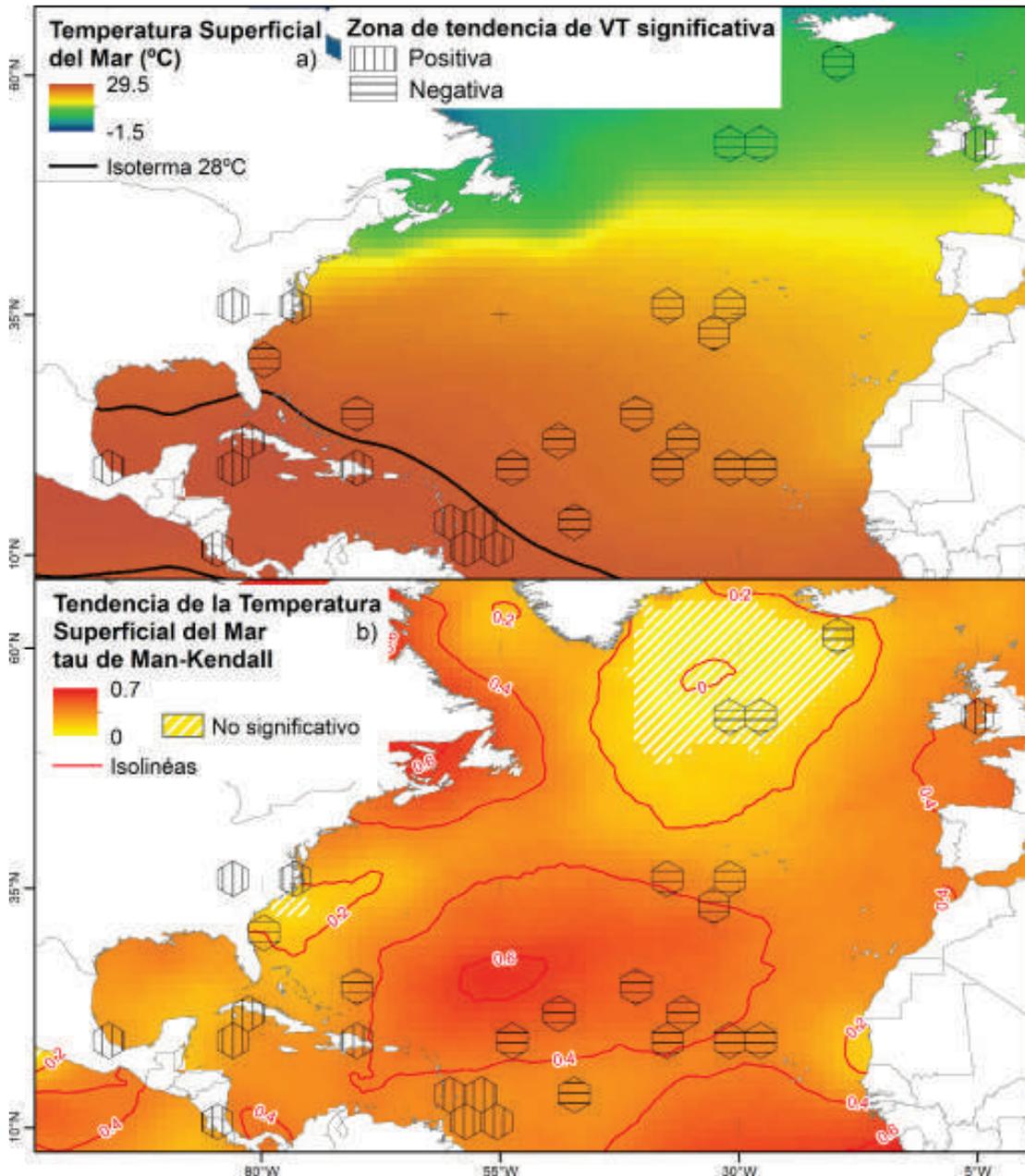
El análisis de las relaciones entre las variables (FD, Frecuencia de Coriolis, Viento máximo, CVV y TSM) mostraron una fuerte relación entre cada una de ellas y las VT de los CT (Tabla 1). La velocidad del FD y la frecuencia de Coriolis tuvieron una relación positiva con las VT, incrementándose a medida que aumenta la latitud. La velocidad máxima del viento mostró una relación negativa con las VT, lo que sugiere que a medida que la categoría en la escala Saffir-Simpson disminuye, las VT de los CT también tienden a ser más bajas en general. Sin embargo, debido a los altos valores residuales, esta variable tiene una menor capacidad explicativa del comportamiento de las VT. La CVV del viento también presentó una relación positiva con las VT. En cuanto a la TSM, la relación negativa con las VT explica de manera más precisa la interacción directa entre la TSM y las VT, seguida por la velocidad máxima del viento.

**Tabla 1. Valores de regresiones lineares entre las VT de los segmentos de trayectorias y las variables físicas. Todas las regresiones lineales tienen un valor de  $p < 0.01$**

Variable	Pendiente	Error estándar residual
FD	1.41	13.83
Frecuencia de Coriolis	2.44E+06	14.05
Viento máximo	-0.02	15.09
CVV	0.27	14.88
TSM	-1.66	13.24

Con relación a la TSM, se encontraron valores altos para latitudes cercanas al ecuador dentro de la cuenca. La región del Atlántico Oeste, en el Golfo de México, Caribe y Costa Este de Estados Unidos, presentó las temperaturas más altas, oscilando entre 25.2°C y 29.5°C, mientras que las latitudes septentrionales mostraron temperaturas más bajas (Figura 2a).

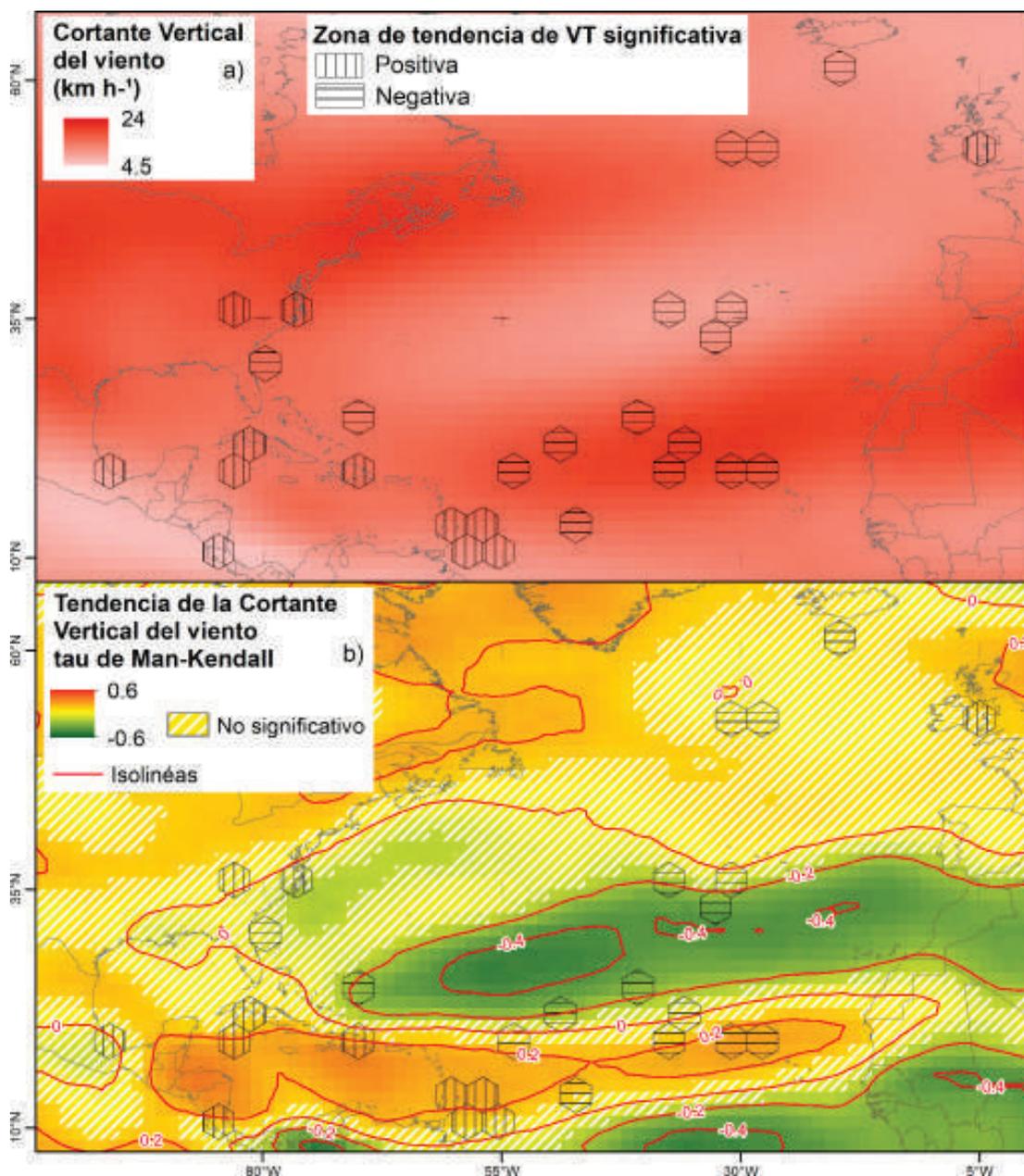
**Figura 2.** Caracterización de TSM a) TSM promedio y b) Tendencia de TSM, valor de tau de Mann-Kendall. Las rayas blancas marcan valores de tendencia no significativos. Los hexágonos negros corresponden a las tendencias significativas de VT, con tendencias positivas (rayas verticales) y negativas (horizontales).



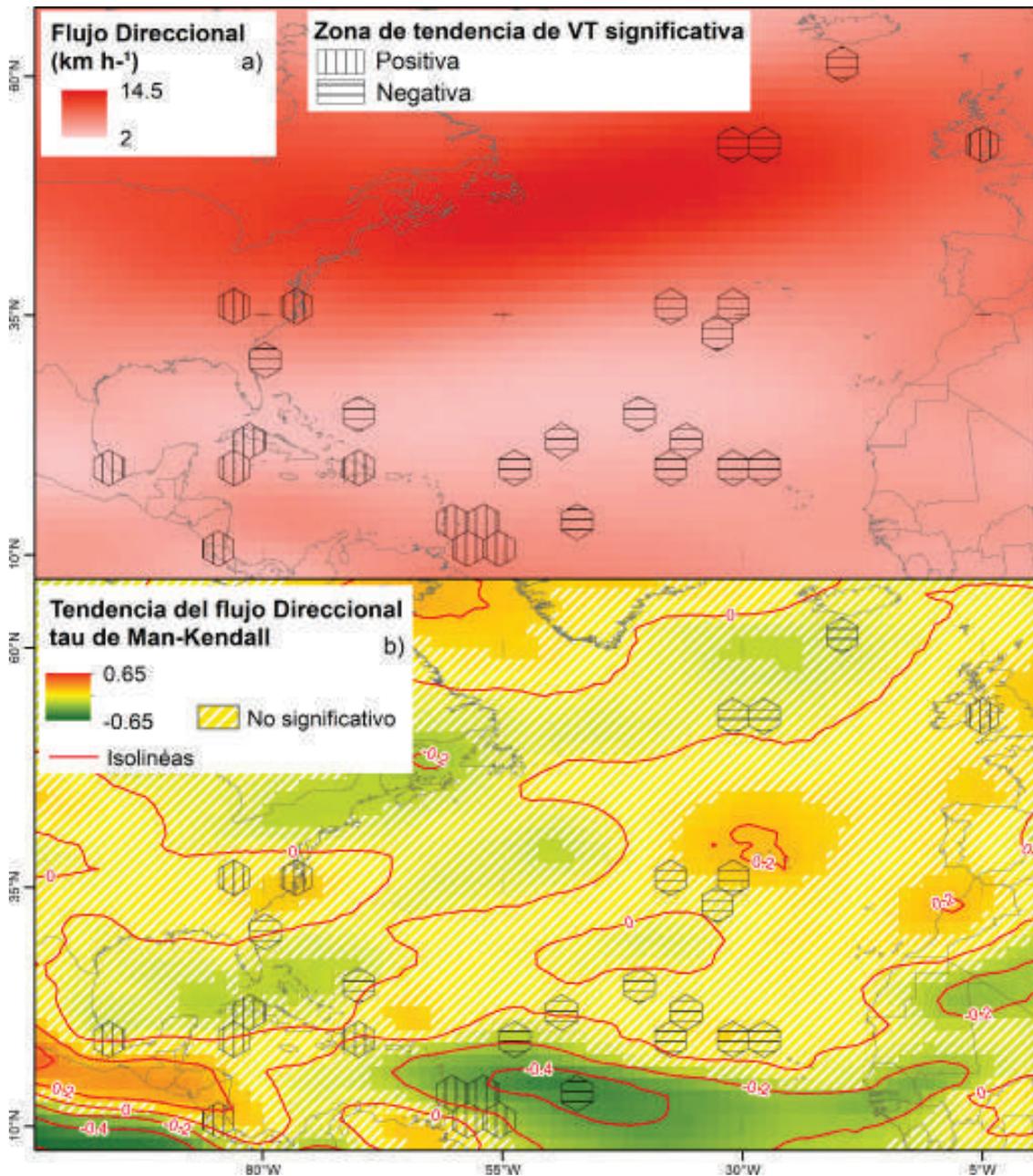
Las tendencias de aumento se observaron en zonas caracterizadas por temperaturas de menor magnitud (Figura 2b). Estas regiones incluyen las costas de Canadá, en el lado oeste, y toda la región del Mar del Norte en el lado este de la cuenca del AN. Los valores de aumento en estas zonas oscilaron entre  $0.024^{\circ}\text{C}$  y  $0.0378^{\circ}\text{C}$ . También se identificó una zona con un calentamiento menor a  $0.006^{\circ}\text{C}$ , ubicada en las costas del norte de África, y se observaron tendencias marcadas de aumento en la región europea, con rangos de  $0.0138^{\circ}\text{C}$  a  $0.024^{\circ}\text{C}$ .

Se encontró una isoterma que divide los valores positivos de los negativos en relación con el incremento y descenso de las VT. Esta isoterma atraviesa la cuenca desde el norte del Golfo de México hasta la región central y sur de la cuenca del AN. Las VT registran valores altos en regiones donde las temperaturas son  $\geq 28^{\circ}\text{C}$ .

**Figura 3. Caracterización de la circulación atmosférica respecto a la cortante vertical del viento (CVV) a) CVV promedio, b) Tendencia de la CVV valor de tau de Man - Kendall.**



**Figura 4.** Caracterización de la circulación atmosférica según el flujo direccional del viento. a) FD promedio y b) Tendencia de FD, valor de tau de Mann-Kendall.



Las estimaciones de la CVV (Figura 3a) mostraron que las celdas con valores negativos en la tendencia de las VT se encontraron en zonas donde la magnitud de la velocidad de la CVV fue alta. Por otro lado, las celdas con valores de aumento de VT se presentaron en regiones donde la CVV, registró valores de bajo nivel, incluso en algunas zonas como Veracruz y Costa Rica donde se registraron los más bajos valores ( $4.5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). De manera contraria, las zonas de VT en descenso se presentaron en regiones de valores elevados, cercanos a los

$24 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , como en la región central sur de la cuenca. En general, las tendencias de cambio en la CVV (Figura3b) no muestran una influencia significativa en las VT, debido a que gran parte de las celdas con tendencias de VT se encontraron en áreas donde la tendencia de cambio de esta variable no fue significativa.

Algunas zonas presentaron tendencias de disminución del FD de la atmósfera. Sin embargo, esto no afectó significativamente las VT de los CT puesto que, en su mayoría, el cambio en esta variable no fue representativo a nivel espacial en toda la cuenca. El FD de la atmósfera muestra, en general, que las VT significativas se distribuyeron en zonas donde los valores son relativamente bajos, cercanos a los  $2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . La zona de mayor flujo direccional fue en la región central norte de la cuenca, sin embargo, solamente 2 celdas con valores de tendencia significativa negativa de VT en función de las velocidades se encontraron en esa zona (Figura4a). Las tendencias de cambio del FD atmosférico fueron pocas y se presentaron en zonas donde no se detectaron tendencias de aumento o disminución de las VT (Figura4b). En una región significativa de bajo cambio en el FD al sur de la cuenca, se encontraron celdas de aumento y descenso de las VT, sin embargo, de manera espacial no pudimos determinar alguna relación importante entre las tendencias de los cambios del FD y las VT.

Según lo descrito por Kossin [7], las VT de los CT en la cuenca del AN disminuyeron de 1949 a 2017. Sin embargo, en nuestro estudio encontramos que esta tendencia general se dio por una mayor extensión de zonas de disminuciones que de aumentos, pero no debe entenderse como espacialmente homogénea. Las VT tendieron a aumentar y disminuir en zonas a escala regional. Las zonas de aumento se encontraron principalmente en el Caribe y el Golfo de México, con un total de 12 celdas con valores de aumento estadísticamente significativas. La única zona de disminución de las VT se encuentra en las costas de los estados de Florida y Georgia en Estados Unidos. Este hallazgo es similar al encontrado por Hallam *et al.* [25]. Las 15 celdas restantes presentaron valores de disminución en la región oceánica del AN (Figura 1b). Es importante destacar que las zonas con valores negativos en función de las VT se encontraron alejadas de las zonas costeras con asentamientos humanos, como menciona Mei *et al.* [13], donde las VT aumentan a medida que la intensidad en la escala Saffir-Simpson disminuye. Esta distribución espacial de las tendencias corresponde con lo encontrado por Yamaguchi *et al.* [26] quienes encuentran en su estudio que las VT en la cuenca del AN presentaron una tendencia significativa de aumento en regiones tropicales, especialmente aquellas con valores  $\leq 20 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$  mientras en latitudes subtropicales, se observó la influencia del aumento de las TSM en las VT de los CT, provocando su disminución.

El valor del error estándar residual en la variable de TSM es de 13.24, lo que indica una relación estadística significativa y una tendencia de aumento de  $0.7^\circ\text{C}$  en la mayor parte de la cuenca. Hallam *et al.* [25] mencionan en su estudio que la tasa de precipitación de

los CT tiene una relación directa con el incremento de las temperaturas toda vez que existe más desarrollo de convección, y que las variaciones de las VT son directamente proporcionales al potencial de inundación. Sin embargo, según nuestros resultados, las zonas con tendencias de aumento en función de las VT se encuentran en regiones por encima de la isoterma de 28°C, que es la TSM necesaria para que se dispare la convección tropical [27]. En relación con las tendencias de aumento de temperatura, se observó que, en las zonas de incremento evidente, no se presentaron celdas con valores significativos de tendencia de VT.

Hallam *et al.* [25] proponen que la CVV tiene influencia en los movimientos de los CT, pero no en sus VT. Esto coincide con nuestros resultados, en virtud de que no encontramos relaciones estadísticamente significativas entre esta variable y las VT. Lau & Zhou [28] evidenciaron una tendencia positiva en la CVV en la región del Caribe y una tendencia negativa en el Golfo de México durante el periodo 1988-2007. Es interesante mencionar que la CVV (Figura 4b) podría inhibir el desarrollo de los CT sobre la región del Caribe si la tendencia continúa aumentando, pero los CTs que se encuentran en el Golfo de México se desarrollarían en una CVV baja, lo que ayudaría a que produjeran más lluvia sobre los estados ubicados en esta región. Los resultados de Domínguez *et al.* [6] demuestran esto, en función de que se encontraron tendencias estadísticamente significativas (a un nivel del 95%) en la precipitación extrema asociada a los CTs en el sur de Veracruz, Tabasco y parte de la Península de Yucatán.

En un estudio realizado por Moon *et al.* [29] mencionan que las VT aumentan en función de la latitud debido a los cambios en el FD atmosférico. Esto se corrobora en la Figura 1a, se confirma que el FD juega un papel fundamental en la evolución de las VT [26], y que están aumentando a un nivel significativo ( $p = 0.001$ ). El análisis mostró una relación estadística significativa entre el FD y las tendencias de las VT (error estándar residual = 13.83) (Tabla1).

Existen pocos estudios sobre las VT, por lo cual resulta difícil contrastar los resultados del presente estudio con otros análisis. No obstante, el enfoque novedoso que consistió en abordar el problema de la evolución temporal de las VT como un conjunto y analizarlo a nivel espacial permitió destacar diferencias en tendencias localmente con VTs que tendieron a ser más rápidas en tierra y en la zona del caribe, mientras tendieron a ser más lentas en las zonas más oceánicas del Atlántico. Estas variaciones se pudieron correlacionar con variables oceánicas y atmosféricas, de las cuales resultó ser particularmente importante la TSM. Este análisis a escala espacial más fina que lo publicado por otros autores [7], tiene una gran relevancia para la evaluación del riesgo vinculado a CT en zonas donde existen asentamientos humanos vulnerables de gran importancia.

## Conclusión

En resumen, las VT no son espacialmente homogéneas en la cuenca del AN, con velocidades bajas en la zona del Caribe y cerca del trópico del Cáncer. En cuanto a sus cambios temporales, experimentaron, a nivel de la cuenca, una disminución de manera general. Sin embargo, se encontraron regiones donde las tendencias fueron positivas, particularmente en tierra y en la zona de los Mares Intra Americanos. Las zonas donde las VT disminuyeron durante el periodo estudiado no se asocian a un factor de riesgo incrementado para las zonas costeras y asentamientos humanos, debido a la lejanía que tienen de las mismas, a excepción de la celda que se encuentra sobre Florida y Georgia, EUA, la cual puede llegar a perjudicar a las comunidades y ecosistemas que se encuentren dentro de la zona de vulnerabilidad de esta región.

Las relaciones estadísticas entre las VT de cada segmento de 3 horas de trayectoria de CT y las variables explicativas integradas a un estudio multivariado fueron significativas (Tabla 1). Esto quiere decir que los cambios en las variables de la TSM, la CVV y el FD, afectarán el comportamiento y desarrollo de las VT de los CT, si es que son analizadas por segmento. La TSM, el FD y la CVV, son las variables que mayor relación sostienen con las VT, siendo la TSM la que más ejerce una influencia en la magnitud de sus velocidades. La revisión literaria y los resultados permiten concluir que, a mayor temperatura, mayores serán las VT y a mayor latitud, mayor VT. No obstante, con un análisis espacial, no se detectó alguna relación clara entre las tendencias observadas de VT y las tendencias de las variables físicas. Únicamente, la isoterma de 28° en mar durante la temporada ciclónica delimita las zonas de tendencias contrarias.

## Agradecimiento

Investigación realizada gracias al Programa UNAM-PAPIIT IA101823.

## Referencias

- Chemke, R.; Zanna, L.; Polvani, L.M. Identifying a Human Signal in the North Atlantic Warming Hole. *Nat. Commun.* **2020**, *11*, 1540, doi:10.1038/s41467-020-15285-x.
- Kaplan, J.; DeMaria, M. Large-Scale Characteristics of Rapidly Intensifying Tropical Cyclones in the North Atlantic Basin. *Weather Forecast.* **2003**, *18*, 1093-1108, doi:10.1175/1520-0434(2003)018<1093:LCORIT>2.0.CO;2.
- Webster, P.J.; Holland, G.J.; Curry, J.A.; Chang, H.-R. Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science* **2005**, *309*, 1844-1846, doi:10.1126/science.1116448.

- Dominguez, C.; Done, J.M.; Bruyère, C.L. Future Changes in Tropical Cyclone and Easterly Wave Characteristics over Tropical North America. *Oceans* **2021**, *2*, 429–447, doi:10.3390/oceans2020024.
- Zhang, D.; Zhang, H.; Zheng, J.; Cheng, X.; Tian, D.; Chen, D. Changes in Tropical-Cyclone Translation Speed over the Western North Pacific. *Atmosphere* **2020**, *11*, 93, doi:10.3390/atmos11010093.
- Dominguez, C.; Llanos-Rodríguez, M.; Ochoa, C.; Welsh-Rodriguez, C.M.; Perez Estrada, A. Sistema de Alerta Temprana Ante Ciclones Tropicales: Propuestas Para Su Mejoría (Early Warning System for Tropical Cyclones: Proposals for Its Improvement, in English). **2019**, *14*, 2019.
- Kossin, J.P. A Global Slowdown of Tropical-Cyclone Translation Speed. *Nature* **2018**, *558*, 104–107, doi:10.1038/s41586-018-0158-3.
- Oey, L.-Y.; Ezer, T.; Wang, D.-P.; Fan, S.-J.; Yin, X.-Q. Loop Current Warming by Hurricane Wilma. *Geophys. Res. Lett.* **2006**, *33*, L08613, doi:10.1029/2006GL025873.
- CRED EM-DAT The International Disasters Database of the Centre for Research on the Epidemiology of Disasters 2022.
- He, C.; Wu, B.; Zou, L.; Zhou, T. Responses of the Summertime Subtropical Anticyclones to Global Warming. *J. Clim.* **2017**, *30*, 6465–6479, doi:10.1175/JCLI-D-16-0529.1.
- Dominguez, C.; Llanos-Rodríguez, M.; Ochoa, C.; Welsh-Rodriguez, C.M.; Perez Estrada, A. Sistema de Alerta Temprana Ante Ciclones Tropicales: Propuestas Para Su Mejoría. **2019**, *14*, 2019.
- McNeil, N.; Chooprateep, S. Modeling Sea Surface Temperatures of the North Atlantic Ocean. *Theor. Appl. Climatol.* **2014**, *116*, 11–17, doi:10.1007/s00704-013-0930-0.
- Mei, W.; Pasquero, C.; Primeau, F. The Effect of Translation Speed upon the Intensity of Tropical Cyclones over the Tropical Ocean: TC TRANSLATION SPEED AFFECTS INTENSITY. *Geophys. Res. Lett.* **2012**, *39*, doi:10.1029/2011GL050765.
- Kim, S.-H.; Moon, I.-J.; Chu, P.-S. An Increase in Global Trends of Tropical Cyclone Translation Speed since 1982 and Its Physical Causes. *Environ. Res. Lett.* **2020**, *15*, 094084, doi:10.1088/1748-9326/ab9e1f.
- Knapp, K.R.; Kruk, M.C.; Levinson, D.H.; Diamond, H.J.; Neumann, C.J. The International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS): Unifying Tropical Cyclone Data. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **2010**, *91*, 363–376, doi:10.1175/2009BAMS2755.1.
- Knapp, K.R.; Diamond, H.J.; Kossin, J.P.; Kruk, M.C.; Schreck, C.J. International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS) Project, Version 4, North Atlantic Available online: doi.org:10.25921/82ty-9e16 (accessed on 31 March 2023).
- Vecchi, G.A.; Knutson, T.R. On estimates of historical north atlantic tropical cyclone activity. *J. Clim.* **2008**, *21*, 3580–3600, doi:10.1175/2008JCLI2178.1
- Landsea, C.W.; Vecchi, G.A.; Bengtsson, L.; Knutson, T.R. Impact of duration thresholds on atlantic tropical cyclone counts. *J. Clim.* **2010**, *23*, 2508–2519. doi:10.1175/2009JCLI3034.1

- Reynolds, R.W. Impact of Mount Pinatubo Aerosols on Satellite-Derived Sea Surface Temperatures. *J. Clim.* 1993, 6, 768–774, doi:10.1175/1520-0442(1993)006<0768:IO MPAO>2.0.CO;2.
- Elsner, J.B.; Hodges, R.E.; Jagger, T.H. Spatial Grids for Hurricane Climate Research. *Clim. Dyn.* **2012**, 39, 21–36, doi:10.1007/s00382-011-1066-5.
- R Core Team *R: A Language and Environment for Statistical Computing*; R Foundation for Statistical Computing: Vienna, Austria, 2022;
- Pebesma, E. Simple Features for R: Standardized Support for Spatial Vector Data. *R J.* **2018**, 10, 439, doi:10.32614/RJ-2018-009.
- Wilks, D.S. *Statistical Methods in the Atmospheric Sciences*; Elsevier Science.; Academic press, 2019; Vol. 4th. ed.;
- Schneider, G.; Chicken, E.; Becvarik, R. *NSM3: Functions and Datasets to Accompany Hollander, Wolfe, and Chicken - Nonparametric Statistical Methods, Third Edition*; 2022;
- Hallam, S.; McCarthy, G.D.; Feng, X.; Josey, S.A.; Harris, E.; Düsterhus, A.; Ogungbenro, S.; Hirschi, J.J.-M. The Relationship between Sea Surface Temperature Anomalies, Wind and Translation Speed and North Atlantic Tropical Cyclone Rainfall over Ocean and Land. *Environ. Res. Commun.* **2023**, 5, 025007, doi:10.1088/2515-7620/acb31c.
- Yamaguchi, M.; Chan, J.C.L.; Moon, I.-J.; Yoshida, K.; Mizuta, R. Global Warming Changes Tropical Cyclone Translation Speed. *Nat. Commun.* **2020**, 11, 47, doi:10.1038/s41467-019-13902-y.
- Webster, P.J.; Magaña, V.O.; Palmer, T.N.; Shukla, J.; Tomas, R.A.; Yanai, M.; Yasunari, T. Monsoons: Processes, Predictability, and the Prospects for Prediction. *J. Geophys. Res. Oceans* **1998**, 103, 14451–14510, doi:10.1029/97JC02719.
- Lau, W.K.M.; Zhou, Y.P. Observed Recent Trends in Tropical Cyclone Rainfall over the North Atlantic and the North Pacific. *J. Geophys. Res. Atmospheres* **2012**, 117, doi:10.1029/2011JD016510.
- Moon, I.-J.; Kim, S.-H.; Chan, J.C.L. Climate Change and Tropical Cyclone Trend. *Nature* **2019**, 570, E3–E5, doi:10.1038/s41586-019-1222-3.



# 3

## Estimación de precipitación por el huracán Ingrid en Veracruz, México

*Luna-Díaz-Peón, Antonio*

Facultad de Biología campus Xalapa, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México. anluna@uv.mx. ORCID: 0000-0002-8076-2544.

*Mantilla-Díaz, Jimena Astrid*

Facultad de Biología campus Xalapa, Universidad Veracruzana, Xalapa, Veracruz, México. jimenaastrid1@gmail.com. ORCID:00090006645064755

*Garay-Peralta, Ignacio*

Tecnológico Nacional de México/Campus Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván. Úrsulo Galván, Veracruz. México. ignacio.gp@ugalvan.tecnm.mx. ORCID: 0000-0003-3091-5255

Citar este capítulo: Luna, A. Mantilla, J. y Garay, I. (2024). Estimación de precipitación por el huracán Ingrid en Veracruz, México. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales Hernández, J.C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim, México. Pp: 53 - 67.

### Resumen:

La predicción de riesgos hidrometeorológicos debe apoyarse en información de calidad y con base en criterios científicos. En México, sin embargo, la disponibilidad de la información climatológica en ocasiones es escasa y se desconoce la calidad de los datos. El objetivo de este trabajo es validar un modelo para estimar precipitación en la región de estudio, la entidad federativa veracruzana, donde no se cuente con puntos de medición climatológica. La metodología consistió en evaluar 11 modelos espaciales de interpolación para estimar la precipitación ocurrida durante el huracán Ingrid en el año 2013 sobre el estado de Veracruz que ocasionó inundaciones, deslaves, deslizamientos

de tierra, entre otras afectaciones más. Para validar cada modelo se utilizaron las 110 estaciones en operación con información diaria ante el paso de Ingrid en 2013, para validar los modelos se eliminaron seis estaciones cuyos datos fueron interpolados. Los resultados indicaron que el mejor modelo proporcionó la interpolación de la precipitación más adecuada con cantidades mínimas de hasta 5.0 mm de precipitación. Por lo que se propone este modelo espacial para conocer la información en puntos donde no se cuenta con registros o cuando por algún motivo se pierde la información donde sí se mide. La información que generó al aplicar el modelo proporcionará el conocimiento científico para la agenda de los tomadores de decisiones en la prevención de desastres por fenómenos hidrometeorológicos, mismos que afectan a regiones donde actualmente no existe cobertura climatológica.

Palabras clave: Estaciones climatológicas, modelación espacial Kriging, riesgos por hidrometeoros.

Línea temática 4: Modelación climática y análisis de procesos

## Introducción

El estado de Veracruz, año con año, es vulnerable a precipitaciones extraordinarias ocasionadas por la presencia de fenómenos hidrometeorológicos (ciclones tropicales, ondas tropicales, frentes fríos y tormentas inmediatas, principalmente), que han ocasionado deslaves e inundaciones, como los casos de los ciclones tropicales (CT) Stan en 2005; Dean en 2007; Barry; Karl en 2010 (Luna & Rivera, 2012) y Fernand e Ingrid en 2013, que afectaron principalmente regiones rurales o comunidades de alta marginación. A pesar de ello, la cantidad de precipitación en algunos sitios no se conoce, pues no se cuenta con instrumentos de medición en los lugares del desastre. Asimismo, en el punto más cercano donde existe información, podría no ser significativo debido a que la diferencia de altitud es mayor a 1000 m o se encuentra a una distancia mayor a 10 km (SMN, 2018).

En México, es el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) el que se encarga de evaluar y dictaminar los desastres naturales. Para el caso de los de fenómenos hidrometeorológicos, el CENAPRED se apoya en la información de precipitación que proporciona el Servicio Meteorológico Nacional (SMN). Sin embargo, en algunos casos no se cuenta con ella, por lo que regularmente utiliza el punto más cercano en distancia, es el método de interpolación conocido como el “del vecino más cercano”, que no considerar la altitud, lo que representa un problema cuando la región de estudio posee una orografía compleja (CENAPRED, 2022).

El problema al que se enfrentan los organismos gubernamentales encargados de evaluar los desastres, tanto el CENAPRED y Protección Civil Estatal, como los tomadores de decisiones, a la hora de establecer una nueva ley en este ámbito, y los científicos que estudian los riesgos hidrometeorológicos y el cambio climático, es la información climatológica limitada, porque no se mide, sobre todo en las comunidades rurales alejadas de centros urbanos o con difícil acceso. Esta situación impide conocer cualquier componente climático y su impacto sobre un ecosistema específico, que pueda ser un factor de riesgo hidrometeorológico: es esencial contar con mediciones climatológicas. Disponer de una base de datos históricos completa y de calidad que permita entender el comportamiento de las variables climáticas en cada región y sus extremos. Este es el caso de las precipitaciones que pueden causar desastres hidrometeorológicos y, sin embargo, se desconoce la dimensión o con qué intensidad se ocasionan: se hace imprescindible una base de datos precisa y confiable.

Es importante destacar que desde 1851, cuando iniciaron los registros de ciclones tropicales, se han presentado poco más de 75 en el estado de Veracruz, que en su mayoría han dejado afectaciones de gran magnitud para la población, incluso, en algunos casos, propiciaron la reubicación de los pobladores (Luna & Rivera, 2012).

En ese sentido, poner a disposición de los tomadores de decisiones las contribuciones de las evidencias científicas, permite discutir las públicamente para tomar las mejores opciones de política pública (Majone, 2014; Parsons, 2002, 2007), sobre todo de prevención ante los riesgos de los fenómenos hidrometeorológicos.

En consecuencia, se propusieron modelos de interpolación espacial para estimar la precipitación en sitios donde no se cuente con instrumentos, por parte de investigadores como Coria *et al.* (2016) y Vicente-Serrano *et al.* (2003).

Los modelos de interpolación espacial que se proponen en esta investigación fueron elegidos considerando que el procesamiento de los datos requiere solamente de una computadora de uso personal, en comparación con los modelos numéricos y los dinámicos, que necesitan forzosamente de supercomputadoras, además de que existen programas que ya cuentan con las aplicaciones de dichos modelos, en la presente investigación se eligió el software *Surfer* (Golden Software, 2008), sin embargo, estas interpolaciones se pueden realizar en otros programas de sistemas de información geográfica.

Los modelos espaciales de interpolación para generar información que se proponen son los siguientes (Golden Software, 2008):

- 1) Kriging
- 2) Inverso a la distancia

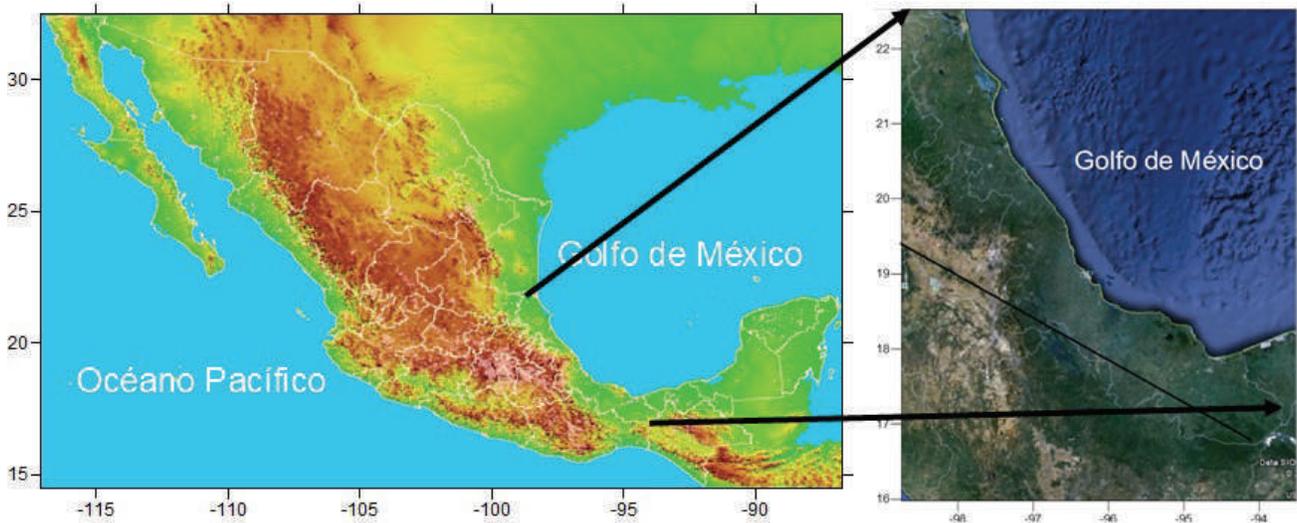
- 3) Mínima curvatura
- 4) Método Shepard modificado
- 6) Vecino más cercano
- 7) Regresión polinomial
- 8) Función de base radial
- 9) Triangulación con interpolación lineal
- 10) Medias móviles
- 11) Polinomio local

En relación con los modelos anteriores, autores como Tسانis y Gad (2001), Kastelec y Košmelj (2002), Vicente-Serrano, Saz-Sánchez y Cuadrat (2003), Carrera-Hernández y Gaskin (2007), Moral (2010), entre otros, han documentado que la modelación Kriging es la que mejor representa las variables climáticas en escala espacial. A esta afirmación, Vicente-Serrano *et al.* (2003) añaden que el principal problema para la selección de cualquier técnica de estimación es la disponibilidad de la información climatológica.

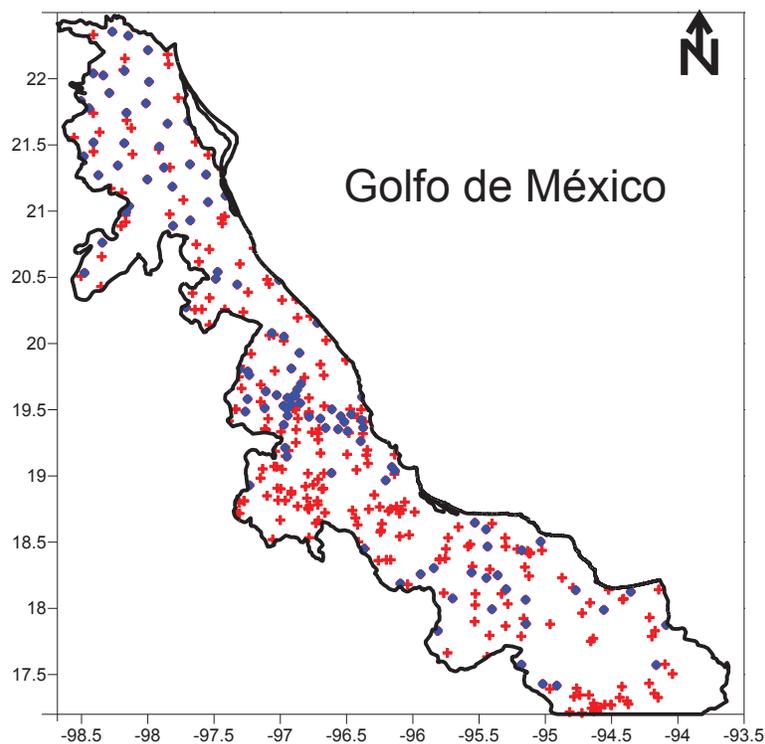
Por lo tanto, el objetivo en esta investigación es evaluar los once modelos propuestos por el software *Surfer* y proponer el que mejor se ajuste para la estimación de precipitación en las regiones donde no se cuenta con las estaciones climatológicas. Considerando que el modelo de interpolación espacial del *vecino más cercano*, para evaluar los riesgos por eventos hidrometeorológicos, actualmente utilizado en México por el CENAPRED (2022), no es el mejor modelo para desastres hidrometeorológicos debido a la orografía accidentada de la zona de estudio.

## Metodología

El estado de Veracruz cuenta con dos planicies costeras, una al Norte y la otra al Sur, dividido por el eje neovolcánico, y alberga a la Región Montañosa Central de la Vertiente del Golfo de México. En la zona sur se localiza la cuenca del Papaloapan donde se han registrado los máximos de precipitación a nivel nacional (por arriba de los 5,000 mm anuales). Cuenta con más de ocho millones de habitantes y 212 municipios, el 6.8% del total del país, de los cuales el 39% es población rural. Además, cinco municipios con más de 200 mil habitantes y 43 con menos de 10 mil habitantes (INEGI, 2016). Asimismo, por su ubicación en el Golfo de México, es una región que año con año es afectada por algún fenómeno hidrometeorológico que ocasiona daños por deslaves e inundaciones (Figura1).

**Figura 1. Ubicación geográfica del estado de Veracruz, México.**

Para esta investigación nos concentramos en la información climatológica del estado de Veracruz proporcionada por la fuente oficial, Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2023), son 353 estaciones (Figura2).

**Figura 2. Ubicación de las estaciones climatológicas en el estado de Veracruz.**

**Fuente:** Elaboración propia con información del Servicio Meteorológico Nacional (SMN,2019).

En la distribución espacial de las estaciones climatológicas que actualmente se encuentran en operación se observan grandes espacios sin cobertura en algunas regiones, donde no se cumple el requisito mínimo de observación climatológica (OMM, 2010).

Se utilizaron 110 estaciones climatológicas ubicadas en el estado de Veracruz con información que el SMN registra de forma diaria y que es utilizada incluso en la elaboración de la información climatológica que se difunde a la población, ya sea por medios de comunicación o de forma directa (Figura 2, puntos en color azul).

## Periodo de análisis de la información

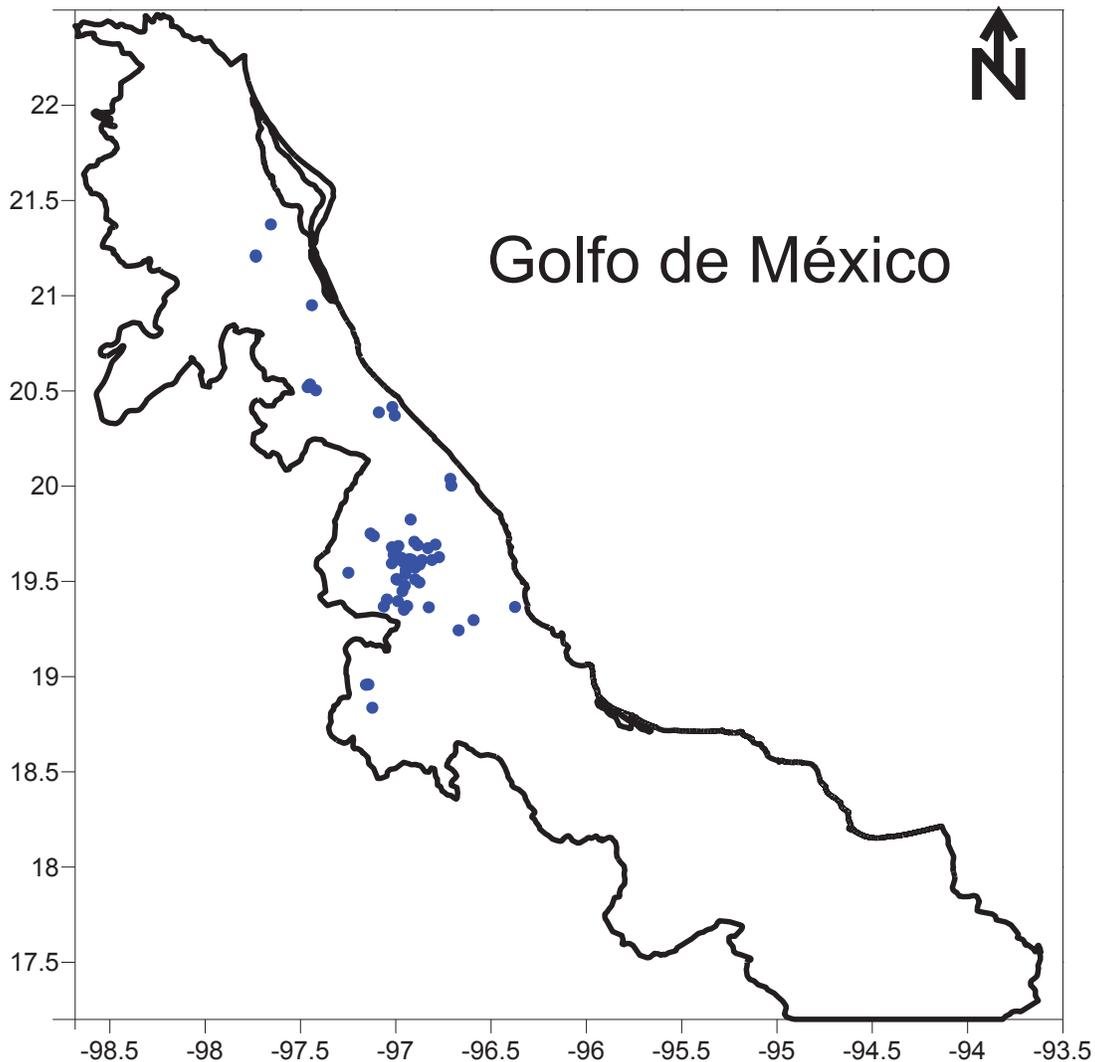
Durante el año 2013, el CENAPRED recibió del estado de Veracruz la solicitud de declaratoria por desastres por fenómenos hidrometeorológicos de seis eventos que propiciaron afectaciones importantes: los ciclones tropicales Barry, Fernand e Ingrid, los frentes fríos 9 y 10, además de la onda tropical número 19 (Tabla1).

**Tabla 1. Fenómenos meteorológicos ocurridos en 2013 y la cantidad de estaciones climatológicas que los registraron.**

Fenómeno meteorológico	Fecha y año	No. De estaciones donde se registró el fenómeno
Tormenta tropical Barry	17-20 Junio de 2013	110
Tormenta tropical Fernand	25-26 Agosto de 2013	108
Onda tropical no. 19	9-10 Septiembre de 2013	107
Huracán Ingrid	15-16 Septiembre de 2013	108
Frente frío n°9	21-22 Septiembre de 2013	108
Frente frío n°10	6-07 Octubre de 2013	105

**Fuente:** Elaboración propia con información del CENAPRED (2022) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN,2019).

Cabe destacar que, en los últimos 30 años, 2013 fue el que más eventos registró, el CENAPRED reportó de manera oficial 142 casos por deslaves, de los cuales 122 fueron en comunidades rurales y el sistema hidrometeorológico que más daños ocasionó fue el huracán INGRID (CENAPRED, 2022; Figura3).

**Figura 3. Ubicación donde se registraron desastres hidrometeorológicos en 2013.**

**Fuente:** Elaboración propia con información del CENAPRED (2022).

## Búsqueda y procesamiento de la información

Para estimar datos faltantes en sitios con diferentes altitudes se realizó la siguiente secuencia:

1. Tomando en cuenta lo dictaminado por la OMM (2011) en sus manuales de operación y que deben ser considerados como fuente oficial de operación, se realizó un análisis exploratorio de las 353 estaciones climatológicas ubicadas en la región de estudio (SMN, 2023). De todas estas estaciones, 243 no registraron datos o en su caso presentaron errores como temperatura máxima menor a la

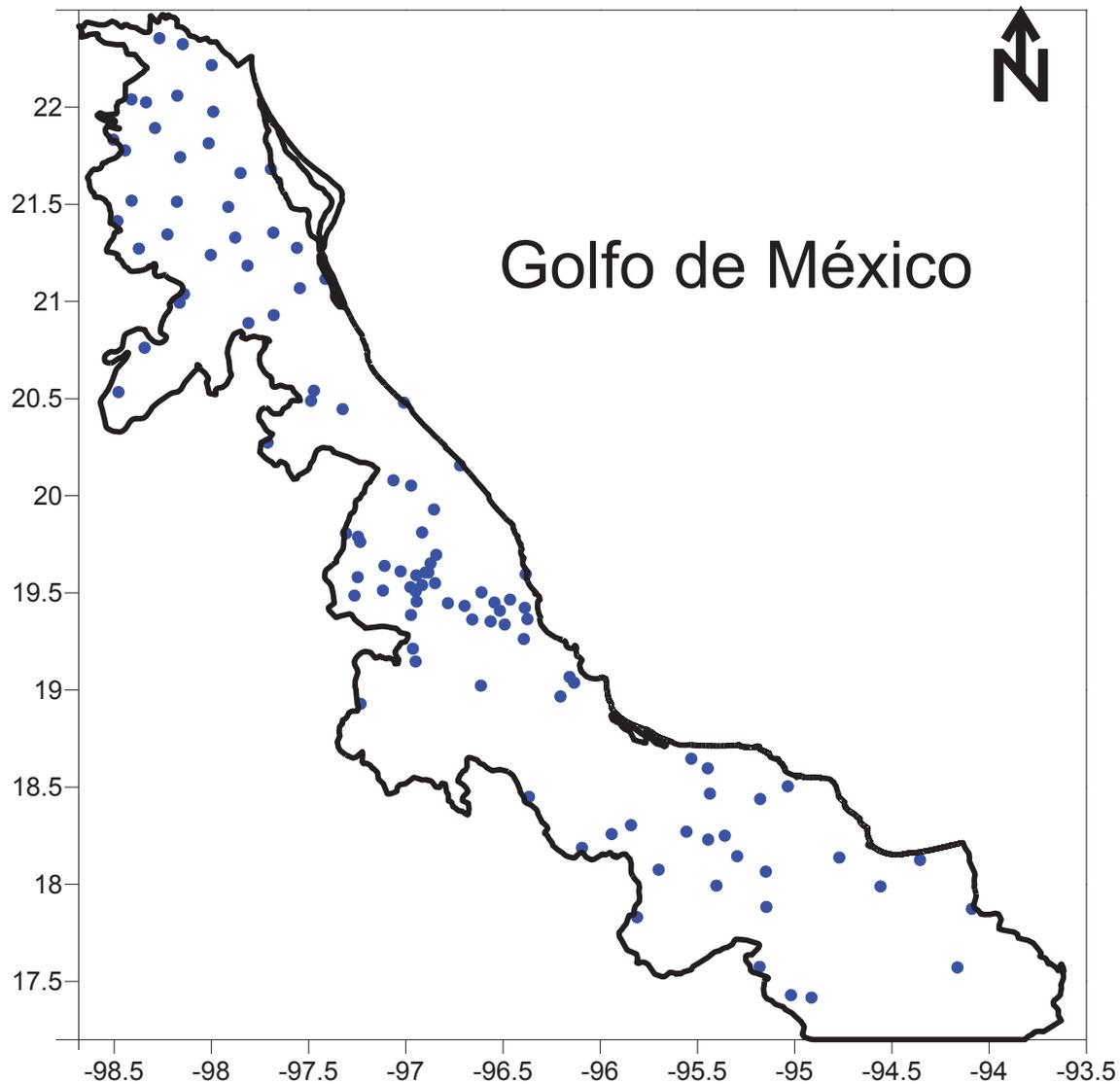
- temperatura mínima o temperatura mínima mayor que la temperatura máxima, o incluso ya están suspendidas, por lo que fueron descartadas. Del análisis estadístico aplicado, solamente 110 comprobaron su consistencia estadística y fueron las que se utilizaron para evaluar los modelos.
2. Con las 110 estaciones de la región de estudio se aplicaron 11 modelos espaciales, Kriging (A), Inverso a la distancia (B), Mínima curvatura (C), Método Shepard modificado (D), Vecino natural (E), Vecino más cercano (F), Regresión polinomial (G), Función de base radial (H), Triangulación con interpolación lineal (I), Medias móviles (J) y Polinomio local (K), para el ciclón tropical Ingrid, considerando cinco días antes del suceso y el día de la ocurrencia.
  3. Para determinar la relación entre los datos observados y modelados se aplicó la correlación de Pearson.
  4. Para determinar el mejor modelo de ajuste se utilizó la técnica estadística de correlación lineal de acuerdo con la metodología utilizada por Agnew y Palutikof (2000). Para nuestra investigación se eliminaron seis estaciones climatológicas distribuidas a nivel estatal, las cuales estaban ubicadas al Norte, Chicontepec de Tejeda y Tecolutla, en el Centro Libertad y Tembladeras (estación más alta de la base climatológica), y al Sur, Alvarado y Loma Grande, con el fin de validar nuestro modelo.
  5. Por cada modelo se elaboraron siete mapas para el análisis espacial, tal y como lo marcan las normas del CENAPRED, para el caso de otorgar los Fondos de Desastres Naturales (Reglas de Operación Del Fondo Para La Prevención de Desastres Naturales, 2010):
    - Primer mapa, del día de ocurrencia del fenómeno hidrometeorológico;
    - Segundo, tercero, cuarto y quinto mapa para cada uno de los cuatro días antes del evento;
    - Sexto mapa, como el mapa acumulado en esos cinco días, y
    - Séptimo mapa como el acumulado de precipitación de 20 días previos al evento.

## Resultados y discusión

### Análisis de la cobertura espacial de la zona de estudio

De las estaciones climatológicas con las que el SMN contaba para la región de estudio al momento de realizar la investigación (SMN, 2023) solo se pudo utilizar el 31% de las mismas. Tal y como se aprecia en la Figura 4 de la entidad federativa se muestra las estaciones climatológicas con su número de identificación y que cuentan con información climatológica para el año 2013.

**Figura 4. Veracruz. Ubicación de las estaciones climatológicas con información diaria ante el paso del huracán Ingrid (2013).**



**Fuente:** Elaboración con información de (SMN, 2016).

## Análisis de los modelos espaciales

El análisis de correlación mostró la modelación de Kriging con el valor más alto con respecto de los datos registrados por las seis estaciones con las que se hicieron los estudios, seguido por el modelo espacial inverso a la distancia. Por otra parte, la correlación más baja fue la de medias móviles (Tabla 2). Por lo que se determinó que Kriging es el mejor modelo de estimación de precipitación para la región de estudio, coincidiendo en esta investigación con Tsanis y Gad (Tsanis y Gad, 2001), Vicente-Serrano y Saz-Sánchez y

Cuadrat (2003), quienes a nivel internacional mencionaron que es el mejor método para estimar la precipitación en escala espacial.

**Tabla 2. Estado de Veracruz. Correlación estadística obtenida con 11 modelos espaciales para la interpolación de precipitación (Año 2013).**

	Modelo espacial	Correlación
A	Kriging	0.996
B	Inverso a la distancia	0.854
C	Mínima curvatura	0.623
D	Método Shepard modificado	0.430
E	Vecino natural	0.638
F	Vecino más cercano	0.569
G	Regresión polinomial	-0.110
H	Función de base radial	0.775
I	Triangulación con interpolación lineal	0.558
J	Medias móviles	-0.494
K	Polinomio local	0.787

Un caso específico se puede observar tomando los resultados arrojados por la modelación para el ciclón tropical Ingrid, donde el día del impacto mostró que, en efecto, la modelación Kriging que se muestra en la Tabla3 en la columna A es la que mejor se ajusta comparada con la registrada, en contraste la modelación regresión polinomial y medias móviles, que fueron las de peor ajuste.

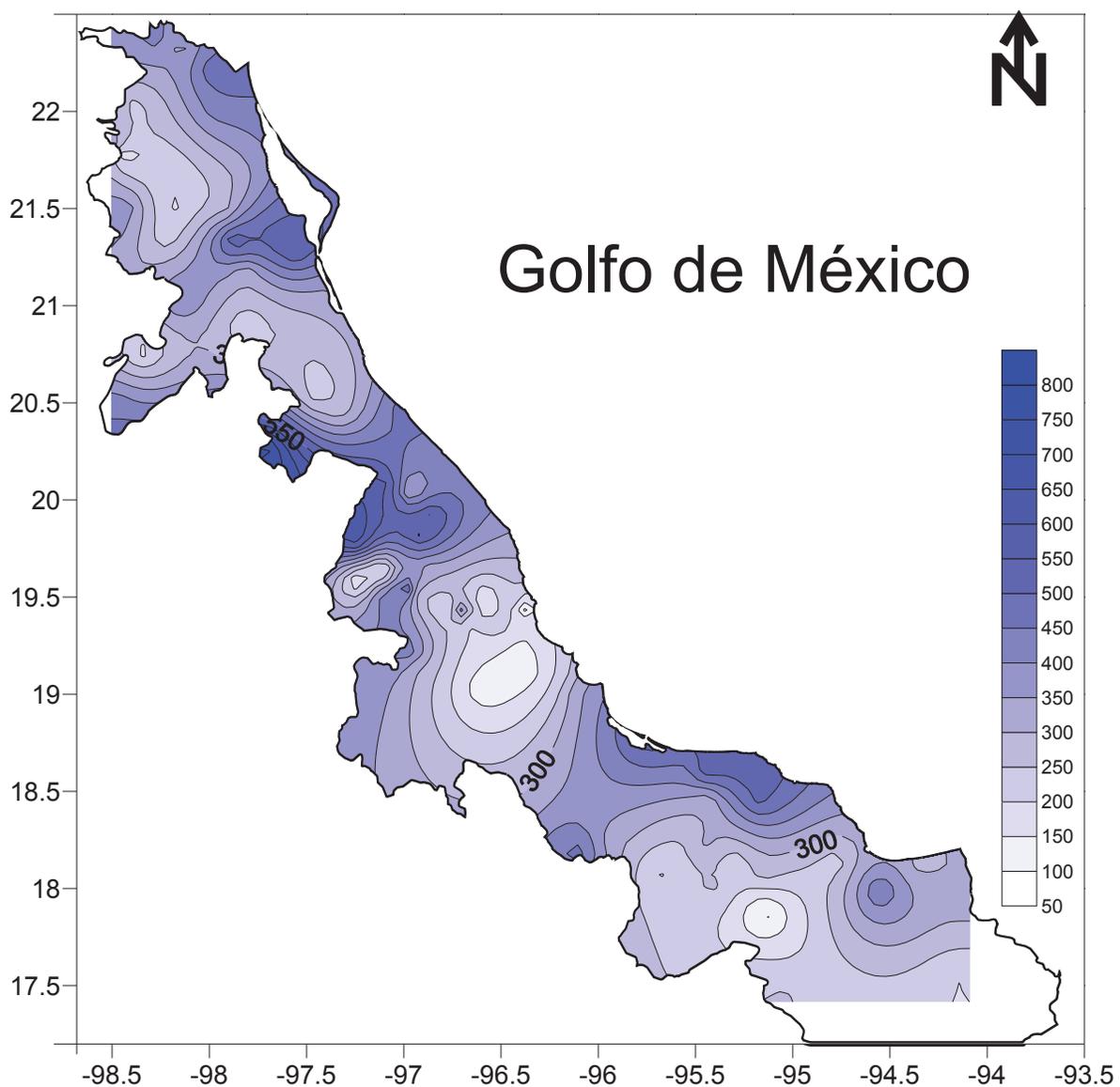
**Tabla 3. Veracruz. Correlación estadística de 11 modelos espaciales.**

Nombre de la estación climatológica	Precipitación registrada (mm)	Precipitación modelada (mm)										
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K
Chicontepec de tejeda (smn)	20	30	95	80	80	75	90	140	70	80	135	80
Tecolutla	195	190	140	70	600	140	40	106	110	140	111	180
Libertad	313	300	195	260	260	200	220	108	220	240	107	170
Tembladeras	243	210	120	20	0	30	20	117	65	0	106	120
Alvarado (dge)	40	40	70	20	0	40	0	77	40	50	105	75
Loma grande	70	67	120	10	0	0	0	127	38	0	109	25

Modelos espaciales usados: (a) modelo kriging, (b) inverso a la distancia, (c) mínima curvatura, (d) método shepard modificado, (e) vecino natural, (f) vecino más cercano, (g) regresión polinomial, (h) función de base radial, (i) triangulación con interpolación lineal, (j) medias móviles, (k) polinomio local.

Uno de los resultados más importantes se destaca con la estación climatológica Chicontepec de Tejeda, que con la modelación Kriging mostró un 67% de precisión de aciertos, mientras que con la modelación de medias móviles fue de un 15%. Otro caso es la estación Libertad, donde la modelación Kriging presentó un 96%, mientras que los modelos de regresión polinomial y medias móviles presentaron una diferencia más alta, pues además de no ser precisos subestimaron la precipitación en 65%.

**Figura 5. Veracruz. Precipitación causada por el ciclón tropical Ingrid (16/septiembre/2013).**



**Fuente:** Fuente: Elaboración propia con información de (SMN, 2016).

Para el caso del CT Ingrid el modelo Kriging (Figura5) muestra tres zonas de máxima precipitación, al norte en la región de la cuenca del Tuxpan, al centro entre las cuencas del Actopan, La Antigua y del Papaloapan y al sur en la cuenca del Coatzacoalcos y sureste de los Tuxtles. Las curvas con los números representan la cantidad de precipitación modelada con Kriging.

Con los resultados mostrados se enfatiza la necesidad de información climatológica, aunque los datos proporcionados por el modelo Kriging resulten confiables, no representan la realidad de la información climatológica. Debemos de estar conscientes que la modelación Kriging puede ser entendida como una predicción lineal o una forma de inferencia bayesiana, parte del principio de que puntos próximos en el espacio tienden a mostrar valores más parecidos que los puntos más distantes; sin embargo, en nuestro caso al no contar con puntos cercanos desconocemos la información. La técnica de modelación Kriging asume que los datos recogidos de una determinada población se encuentran correlacionados en el espacio (Krige, 1951), como es nuestro caso, aunque de forma más espaciada.

Como afirman recientemente Velázquez y Talledos (2018), en el país existe una distribución desigual en la red de estaciones hidrometeorológicas. Estos autores, al igual que (Luna Díaz Peón, Valdés Rodríguez y Solís Villanueva, 2018), identifican otros problemas que enfrenta la red de medición meteorológica, tales como el abandono de las estaciones existentes, la falta de reposición de equipo dañado y la falta de comunicación para reportar datos diarios medidos a Conagua.

Este número reducido de estaciones con datos confiables puede llevar a errores en investigaciones climatológicas futuras. Al respecto, algunos autores han mencionado el problema de falta de datos y con ello la mala interpretación sobre los daños de riesgos hidrometeorológicos ocasionados por los fenómenos atmosféricos, que en muchos de los casos no son registrados debido a que los puntos de medición se encuentran alejados de las zonas de ocurrencia o porque los instrumentos no cuentan con la calidad mínima necesaria, tal y como se documentó en la presente investigación. Estos resultados se refuerzan con lo encontrado por Frausto et al (2018), quien realizó una investigación sobre Clima extremo, Bioclima y Cambio Climático para el estado de Tabasco y áreas adyacentes de México, con 178 estaciones climatológicas del periodo 1914-2010 y 1961-2000, encontrando errores de medición e inconsistencias en los datos.

## Conclusiones

A pesar de que no todas las estaciones presentan datos completos o confiables, las que si tienen sirven para modelar e interpolar hacia donde no hay estaciones.

La investigación mostró la falta de cobertura espacial de estaciones climatológicas en el estado de Veracruz, incluso que su orografía hace que la distancia en las que se encuentran, aquellas que operan actualmente, son inadecuadas. Lo anterior propicia investigaciones erróneas y escenarios futuros con implicaciones climáticas con menor confiabilidad. Los pronósticos meteorológicos se apoyan de la información climatológica que se genera diariamente y, sin embargo, la mala distribución espacial existente conlleva a que dichos pronósticos sean menos certeros.

Para estimar la precipitación de sitios que no cuentan con estaciones o poseen información incompleta se determinó que el modelo de Kriging es el más adecuado para una región montañosa aún con pocas estaciones climatológicas, como lo es la central del estado de Veracruz. Por ello, se propone a este modelo para casos de eventos por fenómenos hidrometeorológicos como la herramienta adecuada para la estimación de la precipitación y su umbral en caso de una contingencia meteorológica, sobre todo en apoyo al riesgo de salvaguardar vidas de las comunidades rurales en sitios inaccesibles del territorio veracruzano.

Con lo anterior, esta investigación contribuye a resolver el problema de la falta de datos climatológicos de forma espacial mediante el modelo de precipitación que se propone con el Modelo Kriging, así, cuando exista un suceso hidrometeorológico de importancia y que ocasione desastres por lluvias, por ejemplo, si el lugar no cuenta con una estación climatológica, se puede aplicar el modelo para estimar la precipitación que ocasionó dicho desastre hidrometeorológico y con ello poder acceder a los fondos de desastres y con ello la recuperación del daño.

## Bibliografía

- Agnew, M., & Palutikof, J. (2000). GIS-based construction of baseline climatologies for the Mediterranean using terrain variables. *Climate Research*, 14(2), 115-127. <https://doi.org/10.3354/cr014115>
- Carrera-Hernández, J. J., & Gaskin, S. J. (2007). Spatio temporal analysis of daily precipitation and temperature in the Basin of Mexico. *Journal of Hydrology*, 336(3-4), 231-249. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.12.021>
- CENAPRED. (2022). *Centro Nacional de Prevención de Desastres*. <https://www.gob.mx/cenapred>
- Coria, S. R., Gay-García, C., Villers-Ruiz, L., Guzmán-Arenas, A., Sánchez-Meneses, Ó., Ávila-Barrón, O. R., Pérez-Meza, M., Cruz-Núñez, X., & Martínez-Luna, G. L. (2016). Climate patterns of political division units obtained using automatic classification trees. *Atmósfera*, 29(4), 359-377. <https://doi.org/10.20937/ATM.2016.29.04.06>
- Frausto, O., Vázquez, A., Colín, O., Hernández, M., Arroyo, L., & Velázquez, D. (2018). Monitoreo de indicadores de resiliencia urbana ante huracanes para las ciudades

- costeras: Playa del Carmen, caribe mexicano. In J. Rodríguez, C. Welsh, Ma. L. Romo, & A. Travieso (Eds.), *RIESGO DE DESASTRES EN MÉXICO: EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS* (1st ed., p. 440 p).
- Golden Software. (2008). *Surfer 8.0*.
- INEGI. (2016). *Conteo de población INEGI 2010*. <http://www.inegi.org.mx/>
- Kastelec, D., & Košmelj, K. (2002). Spatial Interpolation of Mean Yearly Precipitation using Universal Kriging. *Metodološki Zvezki*, 17, 149-162.
- Krige, D. (1951). A statistical approach to some basic mine valuation problems on the witwatersrand. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 52(6), 119-139.
- Luna, A., & Rivera, D. (2012). Los ciclones tropicales en Veracruz y sinopsis del huracán Karl. In A. Tejeda-Martínez (Ed.), *Las inundaciones de 2010 en Veracruz* (1st ed., p. 271). Consejo Veracruzano de Investigación Científica y Desarrollo Tecnológico.
- Luna Díaz Peón, A., Valdés Rodríguez, O. A., & Solís Villanueva, J. A. (2018). Información climatológica de Veracruz, México. In N. Hernández Cortez, L. C. Ruelas Monjardín, & M. E. Nava Tablada (Eds.), *Sustentabilidad del desarrollo: desafíos y propuestas* (1st ed., p. 10).
- Majone, G. (2014). *Evidencia, argumentación y persuasión en la formulación de políticas*.
- Moral, F. J. (2010). Comparison of different geostatistical approaches to map climate variables: Application to precipitation. *International Journal of Climatology*, 30(4), 620-631. <https://doi.org/10.1002/joc.1913>
- OMM. (2010). *Manual del Sistema Mundial de Proceso de Datos y de Predicción Volumen I-Aspectos mundiales* (2010th ed.).
- OMM. (2011). *Guía de prácticas climatológicas* (O. M. M. OMM, Ed.). [https://library.wmo.int/pmb\\_ged/wmo\\_100\\_es.pdf](https://library.wmo.int/pmb_ged/wmo_100_es.pdf)
- Parsons, W. (2002). From Muddling Through to Muddling Up - Evidence Based Policy Making and the Modernisation of British Government. *Public Policy and Administration*, 17(3), 43-60. <https://doi.org/10.1177/095207670201700304>
- Parsons, W. (2007). *Una introducción a la teoría y la práctica del análisis de políticas públicas*.
- Reglas de Operación del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales, 36 (2010).
- SMN. (2018). *Servicio Meteorológico Nacional*. 20. <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>
- SMN. (2023). *Servicio Meteorológico Nacional*. 2016. <http://smn.cna.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica>
- Tsanis, I. K., & Gad, M. A. (2001). A GIS precipitation method for analysis of storm kinematics. *Environmental Modelling and Software*, 16(3), 273-281. [https://doi.org/10.1016/S1364-8152\(00\)00068-2](https://doi.org/10.1016/S1364-8152(00)00068-2)
- Velázquez, J., & Talledos, E. (2018). Comparación del uso de datos meteorológicos observados y procesados en malla en la simulación hidrológica de eventos extremos en una cuenca en México. In J. Rodríguez, C. Welsh, Ma. L. Romo, & A. Travieso

(Eds.), *RIESGO DE DESASTRES EN MÉXICO: EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS Y CLIMÁTICOS* (1st ed., p. 440).

Vicente-Serrano, S. M., Saz-Sánchez, M. A., & Cuadrat, J. M. (2003). Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): Application to annual precipitation and temperature. *Climate Research*, 24(2), 161-180. <https://doi.org/10.3354/cr024161>



# 4

## **Comparativa entre el Fire Weather Index y los incendios registrados en México (2015-2020) e interpretación multidisciplinaria de los resultados**

*Neger, Christoph*

Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, neger@geografia.unam.mx, ORCID: 0000-0001-5210-5005.

*León-Cruz, José Francisco*

Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México, jleon@geografia.unam.mx, ORCID: 0000-0001-5210-5005

Citar este capítulo: Neger, C., León-Cruz, J. F. (2024). Comparativa entre el Fire Weather Index y los incendios registrados en México (2015-2020) y una interpretación multidisciplinaria de los resultados. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales Hernández, J. C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim, México. Pp: 69 - 85.

### **Resumen:**

Las condiciones atmosféricas juegan un papel clave en el incremento de la probabilidad de ocurrencia de incendios forestales. En este sentido, a nivel internacional se ha utilizado ampliamente el Fire Weather Index, para determinar el riesgo de incendios relacionado con condiciones ambientales. En el presente trabajo se realiza una comparativa entre dicho índice en el periodo 2015-2020 y los registros de campo de incendios forestales en México de la Comisión Nacional Forestal. Para ello, empleando una aproximación basada en las diferencias normalizadas de ambos conjuntos de datos, se determinan las coincidencias y diferencias espaciales, y se analizan, desde una mirada multidisciplinaria, las posibles causas de dichos patrones. En este análisis se incluyen tanto factores físicos (relacionados con las características ambientales) como la presencia de diferentes ecosistemas con sus regímenes del fuego respectivos y factores sociales (puesto que

la mayor parte de incendios en México son causados directamente por actividades antrópicas). Se discute la adaptabilidad del Fire Weather Index para distintas regiones del país, así como la viabilidad de este tipo de índices para el diseño de escenarios del riesgo de incendios forestales en el futuro, y sus implicaciones para el manejo del fuego. También se detallan las limitaciones de esta investigación y de la interpretación de los resultados, dada la dificultad de realizar un análisis de mayor profundidad en un estudio a nivel nacional.

Palabras clave: [Incendios forestales](#), [Manejo del fuego](#), [Sequía](#)

Línea temática: [Monitoreo, bases de datos y diseminación de información](#)

## Introducción

Los incendios forestales, definidos en México como la “combustión de vegetación forestal sin control” [1], representan una amenaza considerable para la conservación de los ecosistemas. Si bien es cierto que el fuego tiene funciones benéficas para el mantenimiento de ciertos tipos de vegetación, como los bosques de pino, los incendios de mayor intensidad, frecuencia y extensión tienen el potencial de causar graves daños. Esto aplica todavía más para los ecosistemas sensibles al fuego, como las selvas húmedas, donde se suele registrar una alta mortalidad del arbolado a causa de los incendios, y la regeneración natural tarda varias décadas. Además de la muerte de los árboles, entre los efectos adversos se ha registrado la erosión del suelo, deslizamientos a causa de la pérdida de vegetación, afectaciones a la fauna y, en general, la degradación del paisaje [2-4].

Aunado a estos impactos ambientales, los incendios pueden pasar de las áreas forestales a campos agrícolas y pastizales cultivados, o incluso a zonas urbanas, causando daños en la producción agropecuaria, en la infraestructura y en la vivienda. Entre los efectos de mayor calado se tienen que mencionar las afectaciones a la salud humana, tanto por el contacto directo con el fuego, como por el humo que alcanza a personas lejos del lugar donde ocurre el incendio, perjudicando sobre todo el sistema respiratorio [5-8]. Además, los incendios forestales llevan a la emisión de gases de efecto invernadero, contribuyendo así al cambio climático [9-10].

Dadas estas consecuencias de los incendios forestales, es de suma importancia contar con una gestión del riesgo eficaz que prevenga y mitigue de la mejor manera posible los efectos adversos del fuego. Para alcanzar este objetivo, se tienen que conocer los factores que propician la incidencia de incendios. En este sentido, uno de los principales aspectos son las condiciones atmosféricas, mismas que pueden ocasionar la generación de material combustible suficientemente seco para que se pueda desencadenar un incendio forestal.

Además, el viento juega un papel fundamental en la propagación del fuego [4-5, 11]. Con base en esta realización de la importancia de tales factores, se ha desarrollado el Fire Weather Index (FWI), un indicador de las condiciones meteorológicas favorables para los incendios forestales. Este se desarrolló originalmente en Canadá en los años 70 y 80 del siglo XX [12], y se ha venido utilizando alrededor del mundo, por ejemplo, en estudios en Grecia [13], Perú [14] y China [15]. Recientemente, el Programa de Observación de la Tierra Copernicus de la Unión Europea, incluye proyecciones de riesgo de incendios en el territorio de los estados miembro en el futuro, basados en el FWI [16].

Para el caso de México, aún no existe un estudio que evalúe la aplicabilidad del FWI. En este contexto, el presente artículo indaga en esta temática, a través de una primera aproximación que consistió en la comparación de los datos del FWI contra la incidencia de incendios forestales reportada en los datos oficiales de la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR), provenientes de los registros de campo de las brigadas contra incendios. A continuación, los resultados de este análisis se interpretan y discuten, no solamente desde el punto de vista de las características atmosféricas, sino también tomando en cuenta perspectivas ecológicas y sociales, que ayudan a profundizar la comprensión de las similitudes y diferencias encontradas entre los datos del FWI y la incidencia reportada de incendios forestales. Finalmente, se discuten las implicaciones de este análisis para la aplicabilidad del índice en el contexto mexicano.

## Metodología

Como punto de partida, se descargó la capa de uso de suelo y vegetación a escala 1:250000, serie VII desde el portal de Geoinformación de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) [17]. Posteriormente, cada una de las clases fue reclasificada como vegetación forestal y no forestal. Como vegetación no forestal se consideraron los asentamientos humanos, cuerpos de agua, las zonas agrícolas y acuícolas, así como las zonas desprovistas de vegetación. Los polígonos reclasificados fueron rasterizados con una resolución espacial de 100 metros. Posteriormente, se calculó el área total (en hectáreas) de vegetación natural en cada municipio del país. Los productos previamente mencionados fueron utilizados para cálculos posteriores.

Los datos sobre incendios en México fueron provistos por la Comisión Nacional Forestal [18]. En este sentido, se descargó el catálogo histórico de incendios 2015 - 2020 para todo el país en formato Shapefile. Un total de 40,737 registros se trataron en un sistema de información geográfica (SIG) y se segregaron por mes de ocurrencia, tomando en consideración la fecha de inicio del incendio. Posteriormente, se calculó el número total de incendios entre el área (en hectáreas) de vegetación natural por municipio. Dicho valor se multiplicó por un factor de 1000 para el manejo de decimales. Finalmente, los valores resultantes fueron normalizados de 0 - 1 con el objetivo de su comparación con datos del Fire Weather Index (FWI).

El FWI resulta de la combinación del Initial Spread Index y el Build-up Index, y es una clasificación numérica adimensional de la intensidad potencial del fuego frontal [16]. En otras palabras, es un indicador de la posible intensidad de un incendio resultado de la combinación de la velocidad de propagación con la cantidad de combustible consumido. Los valores del FWI son clasificados comúnmente en cinco clases de peligro: muy bajo ( $<5.2$ ), bajo ( $5.2 - 11.2$ ), moderado ( $11.2 - 21.3$ ), alto ( $38.0 - 50.0$ ) y muy alto ( $\geq 50.0$ ).

Para esta investigación se descargaron los conjuntos de datos del FWI para el periodo 2015 - 2020 a través del Copernicus Climate Change Service [16]. Este conjunto de datos fue computado por el Copernicus Emergency Management Service for the European Forest Fire Information System. Para ello, se empleó el conjunto de datos de reanálisis ERA5 del European Centre for Medium-Range Weather Forecasts [19]. Las mallas, en formato NetCDF, que contienen información diaria, se utilizaron para calcular el promedio mensual del FWI a través del software Climate Data Operators (CDO). Las doce mallas resultantes (una por cada mes) se integraron a un SIG y se enmascararon con la malla de vegetación forestal y no forestal del país. Los valores identificados sobre regiones con vegetación no natural fueron eliminados y, posteriormente, empleando la herramienta de estadísticas de zona, se extrajo el valor promedio de los píxeles en cada unidad espacial, usando la misma división política municipal que en el caso anterior. A continuación, los promedios mensuales del FWI en cada municipio se normalizaron de 0 - 1 a fin de hacerlos comparables con los datos de la CONAFOR.

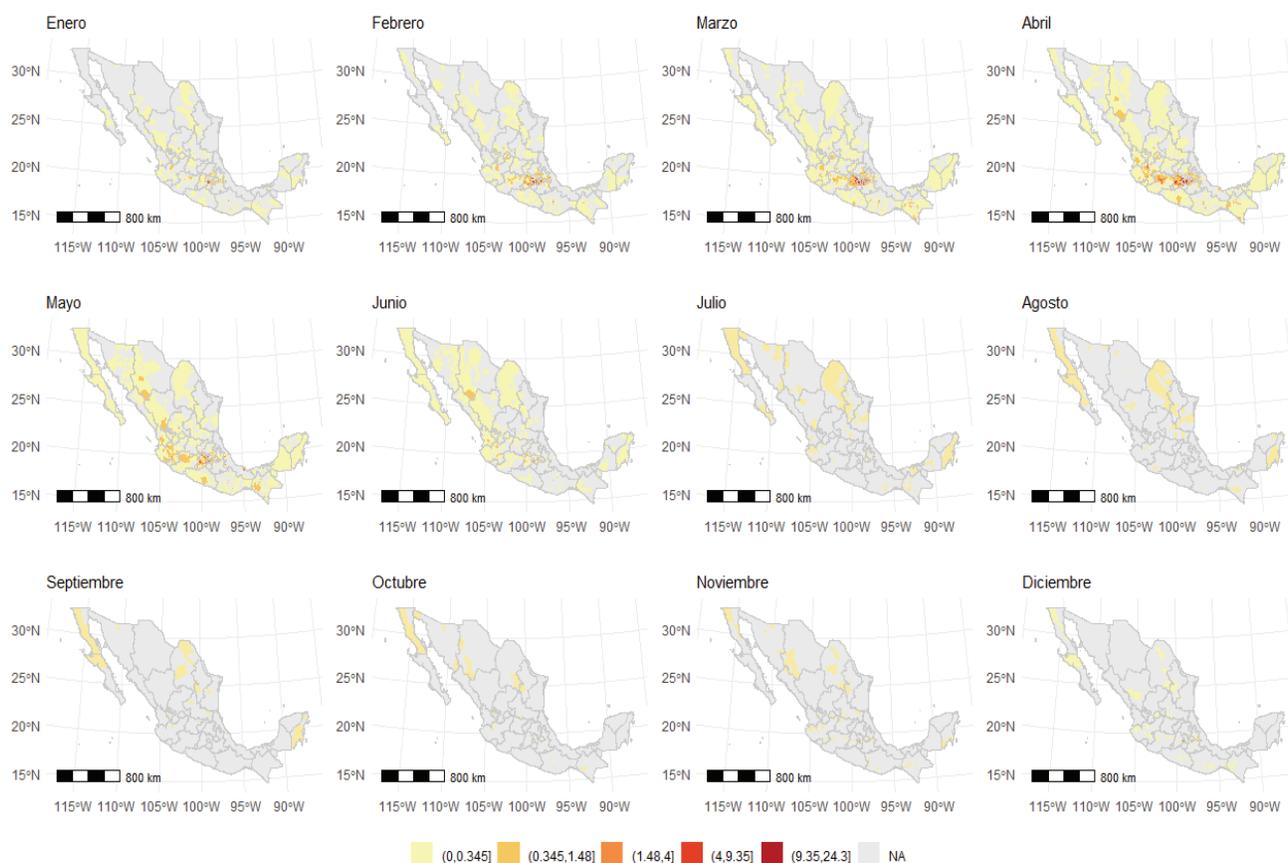
La comparativa entre el número de incendios por área con vegetación forestal y las condiciones propicias para su generación, se realizó mediante una sustracción del valor normalizado del FWI al valor normalizado del número de incendios provisto por la CONAFOR. Las diferencias calculadas buscan representar, espacial y temporalmente, las similitudes y diferencias entre ambas fuentes de datos en México. Es importante notar que dicho cálculo se realizó empleando todas las unidades espaciales, y no solo aquellas que contenían al menos un reporte de incendio.

Finalmente, los resultados de este análisis se discuten, desde la perspectiva atmosférica pero también considerando la ecología del fuego y el papel de la sociedad. En este sentido, se analizan a fondo los atributos de los incendios forestales reportados por la CONAFOR, como tipo de ecosistema afectado y causa, y otras bases de datos como la distribución de los tipos de vegetación y uso del suelo reportada por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Además, se considera la literatura publicada con respecto a incendios forestales en el país, enfocado sobre todo en fuentes que engloban y resumen una cantidad considerable de estudios previos [4, 20] y las publicaciones que se citan como antecedentes en la página web del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF) [21].

## Resultados

La Figura 1, Figura 2 y Figura 3 constituyen el resultado principal de este estudio, comparando el potencial de riesgo de incendios calculado por el FWI con la ocurrencia de incendios forestales reportada por la CONAFOR. En este sentido, se observan tanto similitudes como diferencias marcadas. En primer lugar, tanto en el FWI como en la incidencia observada, abril y mayo son los meses de mayor extensión de áreas con alto riesgo. Otros meses con un número considerable de incendios son febrero, marzo y junio, lo cual también se refleja en el FWI. Sin embargo, según este último, el riesgo es mayor todavía en el mes de diciembre en muchas partes del país, aunque prácticamente no se observa actividad de incendios (según la CONAFOR) en este mes. Es importante notar que, empleando una clasificación basada en el número de incendios por área de vegetación forestal (Figura 1), la región centro del país, muestra los valores más altos, dejando en claro la problemática que representa para zonas densamente pobladas como el Valle de México. Asimismo, se puede observar una transición de centro - oeste - noroeste, comenzando en febrero, teniendo su punto álgido en las regiones centrales del país durante marzo y abril, y transaccionando hacia el occidente en mayo y hasta junio, en la región noroeste.

**Figura 1. Número de incendios a nivel municipal por el área (en ha) con vegetación forestal (2015-2020). Los valores obtenidos fueron multiplicados por 1000 para el manejo de decimales. Elaboración propia con base en CONAFOR (2021).**



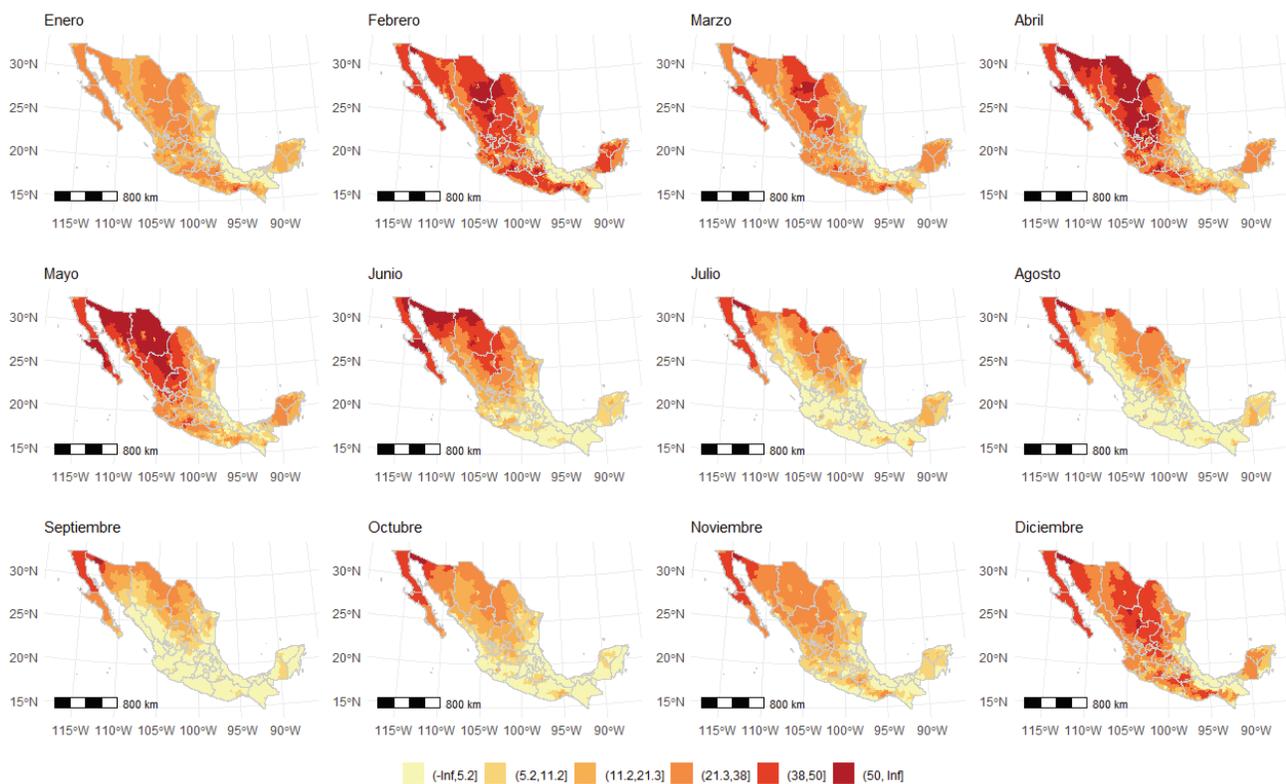
A nivel regional, los valores del FWI son significativamente más altos en el noroeste del país, y solamente en los meses de mayor riesgo también presenta valores elevados -pero todavía más bajos- para el sur y sureste. En cuanto a la incidencia de incendios observada, se puede detectar una concentración a lo largo de la Sierra Madre Occidental y en el noroeste del país; sin embargo, en los meses de febrero a mayo, la incidencia se reparte alrededor de todo el territorio nacional. Como excepción, resalta el caso del estado Baja California que presenta valores altos del FWI durante todo el año (excepto en enero), y que cuenta con incidencia variable de incendios forestales de marzo a octubre.

Con respecto a las diferencias entre las dos fuentes de datos que se presentan en la Figura 3, sobre todo en el sur y sureste del país se observa una gran coincidencia durante gran parte del año, particularmente de mayo a noviembre. Es importante notar que dichas coincidencias principalmente se observan durante meses en los cuales no se reportan demasiados (y en la mayoría de los casos no se reportan en absoluto) incendios forestales en esta región. Aquí, el FWI responde de manera efectiva al indicar un potencial de riesgo de incendios bajo. Esto incluye también durante gran parte del año (mayo a noviembre) la mayor parte la zona central del Eje Neovolcánico Transversal, incluyendo la ciudad de México y sus alrededores, que presenta los mayores valores de incendios forestales por superficie de vegetación forestal a nivel municipal. También durante el resto del año las discrepancias no son tan altas, salvo en febrero y de menor medida en abril.

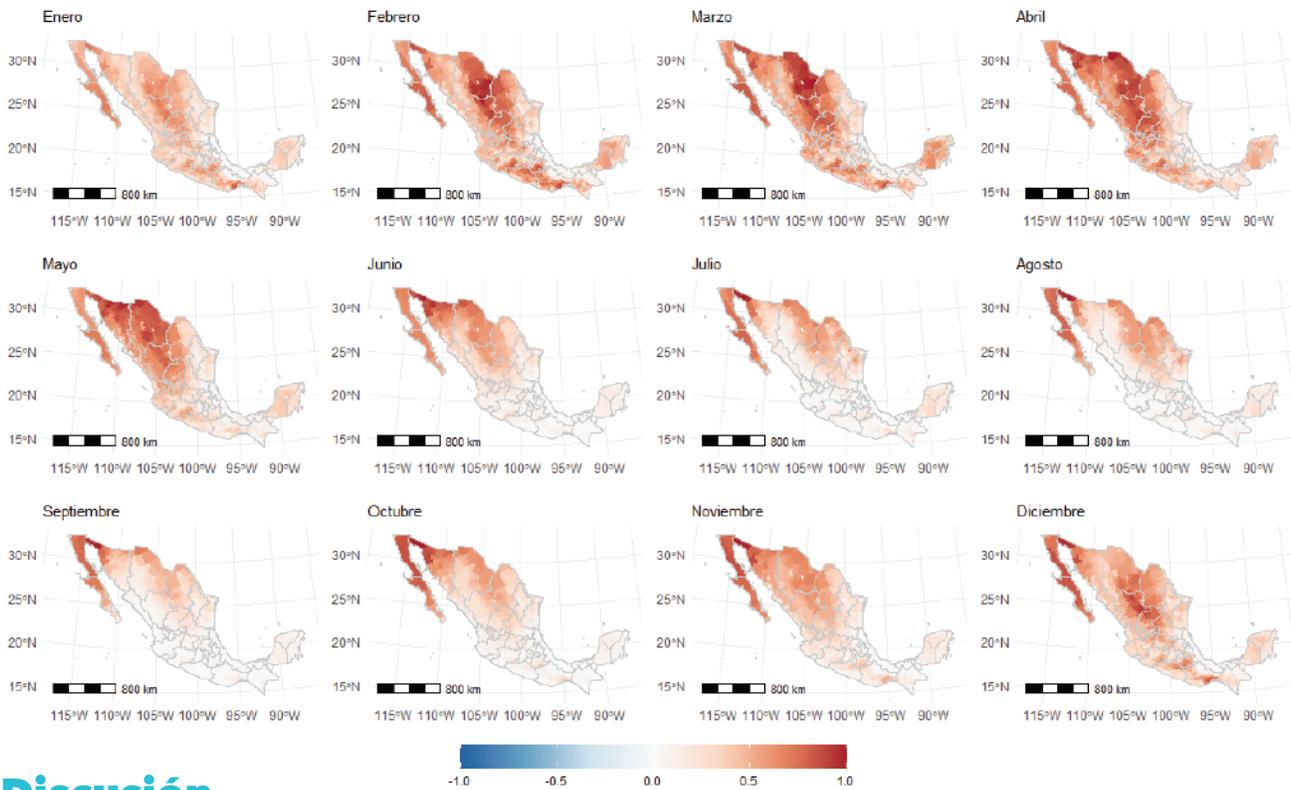
Otra cuestión destacable es que no se reporta prácticamente ninguna región donde el FWI indique una subestimación en comparación con la incidencia reportada de incendios. Es decir, en ningún caso, el FWI indica un bajo riesgo en una zona con alta incidencia de incendios forestales por área de vegetación forestal, subrayando la confiabilidad de los resultados de este índice.

Contrario a estas coincidencias, también hay discrepancias considerables, con áreas extendidas durante gran parte del año donde el FWI sobreestima por mucho el riesgo de incendios. Estas son más pronunciadas en los meses de febrero a abril, extendiéndose por la mayor parte del país, incluyendo zonas en el centro y el sur. A partir de mayo, las zonas de alta sobreestimación se mueven hacia el norte y noroeste, siendo los estados de Baja California, Baja California Sur, Chihuahua y Sonora las que presentan los valores más altos. Para diciembre y enero la imagen de los mapas se presenta más compleja, con zonas con discrepancias entre FWI y registros de incendios considerables en muchas zonas del norte, centro y sur del país, pero menos intensos que en los meses siguientes.

**Figura 2. Promedio mensual del Fire Weather Index por municipio (2015-2020).** El valor promedio por municipio se calculó después de aplicar una máscara que considera únicamente las zonas con vegetación forestal. Elaboración propia con base en C3S y CNS (2019).



**Figura 3. Diferencia mensual por municipios entre los incendios reportados por la CONAFOR por el área de vegetación forestal y el Fire Weather Index. Elaboración propia.**



## Discusión

Interpretación climática: Los patrones de riesgo indicados por el FWI tienen que ver principalmente con la distribución de la precipitación y los vientos. En este sentido, un clima predominantemente seco (baja precipitación) se observa en el norte y noroeste del país, y una destacada diferencia entre temporadas de estiaje y de lluvias en el resto del territorio, con distintas intensidades y duraciones dependiendo de cada región. Entre las zonas con el mayor tiempo del año con bajo riesgo de incendios, relacionados con altos valores de precipitación, destacan la mayor parte del estado de Veracruz, Tabasco y el norte de Chiapas, una zona donde predominan climas húmedos cálidos y muy cálidos [22]. Los meses con menor riesgo, y también menor incidencia observada de incendios, son septiembre y octubre, lo cual ha sido descrito anteriormente con respecto a los megaincendios con tamaños mayores a 500 ha [7].

Para el caso del viento (incluido en el FWI como mecanismo de propagación de incendios) se observan también características estacionales. Por ejemplo, para los meses de invierno e inicio de la primavera, los altos valores del FWI (así como las marcadas diferencias calculadas en la Figura 3), pueden atribuirse al paso de sistemas frontales, principalmente en el norte de México y a lo largo de la zona conocida como el Desierto de Chihuahua. Este patrón de vientos y su atribución sinóptica ha sido investigada previamente en el país [23], aunque no necesariamente se había identificado su rol en la generación de

condiciones potenciales de incendios. Misma situación se observa hacia el noroeste de México, principalmente durante el otoño, sobre el norte de Baja California y Sonora, donde los vientos de Santa Ana, previamente analizados en la región [24-25] se identifican como el sistema predominante.

Interpretación ecológica: Muchas de las zonas con alto potencial de riesgo de incendios identificados por el FWI presentan un número bajo de incendios, o ni no tienen registros, sobre todo en el norte y noroeste del país. Precisamente las zonas con mayor potencial de riesgo coinciden en gran parte con la ecorregión Desiertos de América del Norte [26], donde como vegetación natural predominan los ecosistemas matorral desértico micrófilo, matorral rosetófilo y, en el caso de la península de Baja California, matorral sacrocasicale [27]. Se trata de ecosistemas con una fisionomía abierta, debido a la aridez que limita la producción de biomasa [28], lo cual se traduce en una baja disponibilidad de material combustible. En matorrales áridos donde se observa una falta de continuidad horizontal de los combustibles, no existen condiciones propicias para la propagación del fuego, por ende, se consideran ecosistemas independientes del fuego; otros matorrales desérticos sí presentan condiciones aptas para el fuego, pero los tiempos de recurrencia suelen ser bajos [4, 29]. En el periodo estudiado, sólo el 1.9 % de los incendios a nivel nacional ocurrió en los tipos de matorrales mencionados.

Con excepción de las praderas alpinas de las altas montañas, que ocupan un porcentaje menor de la superficie del país, todos los demás ecosistemas naturales cuentan con la presencia del fuego [29]. La ocurrencia de los incendios en estos ecosistemas depende de las características de los combustibles como cantidad y humedad. En México, este aspecto hasta la fecha ha sido el más estudiado con respecto a la identificación del riesgo de incendios [30-31], retomando estudios previos de cantidades de carbono disponible [32] e integrando índices de sequedad del combustible [33] o del verdor de la vegetación [34]. Estos estudios forman la base del Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF) que actualmente se utiliza a nivel nacional [21].

Tomar en cuenta la interacción entre combustibles forestales disponibles y condiciones atmosféricas es particularmente útil para comprender la incidencia de incendios forestales en ecosistemas mantenidos por el fuego, como en los bosques de pino. Estos en general cuentan con una recurrencia de incendios menor a quince años [4] y concentraron el 53.1 % de los incendios en el país (incluyendo los bosques de pino-encino) durante el periodo de estudio. Estas zonas se distribuyen sobre todo a lo largo de la Sierra Madre Oriental, Occidental y del Sur, la Sierra Madre de Chiapas y el Eje Neovolcánico Transversal [27], coincidiendo con gran parte de las zonas de mayor incidencia de incendios observados. La definición del potencial de riesgo de incendios por el FWI en estas zonas generalmente es más certera.

Interpretación social: Gran parte de la incidencia de incendios forestales en el país se pueden explicar por las condiciones atmosféricas y la ecología del fuego. Sin embargo,

también hay una incidencia importante en varias áreas del país donde predomina vegetación sensible al fuego, donde naturalmente solo habría incendios en intervalos de siglos o incluso milenios [4]. Es ahí que entra el factor humano, que en la actualidad es la principal causa de ignición en México. En este sentido, del total de los incendios forestales registrados en el periodo de estudio en el país solo 1.6% tuvieron una causa natural (generalmente rayos) mientras que en el 10.6% de los casos la causa fue desconocida; en 87.8% de los casos, la causa se atribuyó a la influencia del ser humano. Entre estas causas antrópicas destacaron las actividades agropecuarias como por ejemplo, las quemas agrícolas que salen de control (36.7%); las actividades ilícitas (24.1%) y las fogatas (10.7%). No obstante, el hecho de causar incendios no es la única manera cómo el ser humano influye en la incidencia de incendios. También las actividades de manejo son de importancia, debido a que pueden reducir el riesgo [35-36]. Además, hay que tener en cuenta que los registros de la CONAFOR se basan mayormente en datos recogidos en campo por esta instancia y otros actores que colaboran con ella; no necesariamente son completos, como algunos autores indican en estudios de caso [36-37], y podrían tener cierta inclinación hacia un registro más riguroso en zonas de mayor interés desde el punto de vista forestal y de la protección civil, como en cercanía de zonas urbanas. Lo anterior resulta más evidente dados los resultados encontrados en la Figura 1, donde hay una relación entre las zonas urbanas del centro del país y los valores más altos de incendios por vegetación forestal a nivel municipal.

Algunos autores han propuesto maneras de cómo modelar el riesgo relacionado con la actividad humana. Los indicadores que se utilizan en general son datos que se obtienen de las estadísticas oficiales como la cercanía de localidades, áreas agrícolas o vías de comunicación [31, 38-39]. Sin embargo, esta selección de indicadores es problemática, pues las vías de comunicación pueden contribuir al riesgo de incendios, pero también pueden ser de ayuda para el manejo del fuego y su decremento [40]. Además, no se consideran los aspectos mencionados del posible subregistro y del manejo del fuego; Galván y Magaña, en este contexto, incluyen la presencia de áreas naturales protegidas como indicador de la presencia de actividades de manejo que disminuyen el riesgo [35], pero este aspecto tampoco es generalizable para todo el país, como lo demuestran los más de diez mil incendios en áreas protegidas en el periodo de estudio. En este sentido, aún falta explorar cómo cuantificar mejor el riesgo de incendios forestales relacionado con el papel de la sociedad.

Aplicabilidad del Fire Weather Index para México: El FWI logra detectar, en términos generales, zonas con riesgo de incendios forestales en el país. Sin embargo, en diferentes zonas y en ciertos meses o incluso durante todo el año, este índice sobreestima el riesgo o incluso indica un alto riesgo de incendios en zonas sin incidencia observada en los datos oficiales. En este sentido, el índice por sí solo es insuficiente para proyectar el riesgo de incendios forestales en el país, y requiere ser completado con datos adicionales, sobre todo con respecto a la cantidad de combustibles forestales y al aspecto social.

Dicho esto, tampoco debe descartarse por completo el uso del FWI dentro de un sistema más amplio de indicadores, dado que ofrece varias ventajas con respecto de los datos meteorológicos que en la actualidad suelen utilizarse dentro del SPPIF. El uso de productos de modelos de circulación global como los de ERA5 [19], empleados en el cálculo del FWI, ofrecen ventajas sobre datos in situ, debido a la cobertura espacial y temporal, así como la resolución [41].

Teniendo en cuenta que en México existen carencias importantes en cuanto a la cantidad de estaciones y la calidad de los datos que se extraen de ellas [42], los productos de reanálisis pueden ser útiles para la identificación de áreas críticas, no solamente en la actualidad sino también para la elaboración de proyecciones, bajo distintos escenarios de cambio climático, como ya lo realiza el Copernicus Climate Change Service con base en el FWI para los estados miembro de la Unión Europea [16].

Además, la simulación de periodos largos y la emisión de boletines al inicio de la temporada de incendios pueden ser algunas de las aplicaciones de índices como el FWI, complementado con otro tipo de información que permita su correcta interpretación. Todo esto puede apoyar en la planeación estratégica de las actividades de manejo, al definir las áreas prioritarias donde se requiere mayor atención a la prevención física y cultural y contar con los recursos necesarios para el combate de los incendios [43].

Las diferencias detectadas entre el FWI y los datos de la CONAFOR se atribuyen mayormente a cuestiones sociales y a parámetros ecológicos. Asimismo, no se descarta que la atención a zonas prioritarias puede llevar a una subestimación del número de incendios a nivel nacional por parte de las instituciones encargadas. Estudios previos han identificado estas diferencias [7, 36-37], por tanto, la comparativa entre otro tipo de fuentes de datos sobre incendios, por ejemplo, aquellas basadas en productos satelitales [44], puede ser una ruta para seguir en futuros estudios de validación de este tipo de índices en el país.

En resumen, el FWI se debe considerar como una herramienta más para la detección de condiciones potenciales de incendios en México. En este sentido, se proponen ajustes a dicho índice basados, principalmente, en elementos naturales. Por ejemplo, la valoración del uso de suelo y sus propiedades para funcionar como combustible, y la reinterpretación de los valores de sesgo del FWI según el periodo estacional en el que se calcule. Futuras investigaciones deberán centrarse en tópicos similares a los mencionados, o bien, en la generación de un nuevo índice (o la adaptación de los ya creados) para regiones tropicales y subtropicales.

## Conclusiones

La presente investigación compara la estimación del riesgo de incendios forestales calculada a través del FWI en México con la incidencia observada en campo, a través de los registros de la CONAFOR. Para evitar una interpretación errónea, dadas las grandes diferencias de superficie de los municipios y la variedad de usos de suelo, entre forestales y no forestales, se calcularon valores normalizados del número de incendios en relación con la superficie de vegetación forestal a nivel municipal.

Se observó que el FWI coincide con las variaciones estacionales de los sistemas atmosféricos prevalentes. En este sentido, en la mayoría de los casos los meses y áreas con riesgo bajo identificados por el FWI coinciden con una baja o nula incidencia de incendios. Sin embargo, en muchos otros casos se vio que el índice presenta una sobreestimación. Esto se interpretó desde el punto de vista ecológico y social, destacando la necesidad de combinar este u otros índices con datos adicionales acerca de las características de los combustibles forestales y factores relacionados con la sociedad. También se resalta la utilidad del FWI en comparación con otros enfoques de proyección meteorológica, dado la utilización de productos de modelos de circulación global.

Cabe mencionar que este trabajo enfrentó algunas limitaciones que tienen que ver con la disponibilidad y calidad de los datos utilizados, entre otros (1) el enfoque en número de incendios y no otras características más detalladas como su extensión, su intensidad y efectos ambientales y socioeconómicos, (2) la utilización de municipios como unidades de análisis en lugar de unidades ecológicas, y (3) posibles sesgos en los datos de incendios observados en campo. Además, al utilizar datos de vegetación del INEGI (las únicas que se encontraron a nivel nacional que distinguen claramente entre vegetación forestal y no forestal), se debe tener en cuenta que se trata de una resolución de 1:250.000 que presenta un grado considerable de inexactitud.

En este sentido, futuros estudios podrían profundizar en el análisis de la aplicabilidad del FWI, integrando también otras fuentes de información, por ejemplo, los estudios aplicando productos satelitales. Además, se requieren investigaciones que indaguen de mejor manera cómo modelar la influencia humana en la ocurrencia de igniciones de vegetación. Esto, combinado con los avances notables que ya se tienen en el país acerca del estudio de los combustibles forestales, podría llevar al desarrollo de un método más completo, que coadyuve a guiar las actividades de manejo en el corto y mediano plazo, y a estar preparado frente a los distintos escenarios de cambio climático.

El trabajo aquí presentado consiguió el objetivo de presentar una primera aproximación a la aplicabilidad del FWI en México, al compararlo con los valores de incendios forestales registrados en campo. Se comprobó que este índice presenta un recurso útil para la estimación del riesgo, con coincidencias entre el riesgo estimado y la incidencia observada

en gran parte del país durante varios meses del año, pero que tiende a sobreestimar en riesgo sobre todo en el noroeste del país. Se realizó una interpretación multidisciplinaria de estos resultados, considerando aspectos climáticos, ecológicos y sociales que contribuyeron a entender mejor las incongruencias entre el FWI y la incidencia observada. Se concluye que el FWI presenta un recurso de gran relevancia para la estimación del riesgo de los incendios forestales a nivel nacional, pero que tiene que ser combinado con otras fuentes, y realizar estudios más detallados a nivel regional y local.

## Reconocimiento

Esta investigación se realizó gracias al programa UNAM-PAPIIT IA300623.

## Referencias

- [1] Diario Oficial de la Federación 28-04-2022. Ley General de Desarrollo Forestal Sustentable. Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 5 de junio de 2018. Texto vigente. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGDFS.pdf>
- [2] de la Barrera, F., Barraza, F., Favier, P., Ruiz, V., & Quense, J. (2018). Megafires in Chile 2017: Monitoring multiscale environmental impacts of burned ecosystems. *Science of the Total Environment*, 637-638, 1526-1536. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.119>
- [3] Jager, H. I., Long, J. W., Malison, R. L., Murphy, B. P., Rust, A., Silva, L. G. M., Sollmann, R., Steel, Z. L., Bowen, M. D., Dunham, J. B., Ebersole, J. L., & Flitcroft, R. L. (2021). Resilience of terrestrial and aquatic fauna to historical and future wildfire regimes in western North America. *Ecology and Evolution*, 11(18), 12259-12284. <https://doi.org/10.1002/ece3.8026>
- [4] Rodríguez-Trejo, D. A. (2014). Incendios de vegetación: su ecología, manejo e historia. Vol 1. Ciudad de México, Colegio de Postgraduados.
- [5] Ferreira-Leite, F., Bento-Gonçalves, A., Vieira, A., & da Vinha, L. (2015). Mega-fires around the world: A literature review. En: A. J. Bento-Gonçalves, & A. Avelino (Eds.), *Wildland fires: a worldwide reality*. Nueva York, Nova Science Publications, p. 15-33.
- [6] Matz, C. J., Egyed, M., Xi, G., Racine, J., Pavlovic, R., Rittmaster, R., Henderson, S. B., & Stieb, D. M. (2020). Health impact analysis of PM2.5 from wildfire smoke in Canada (2013-2015, 2017-2018). *Science of The Total Environment*, 725, 138506. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138506>
- [7] Neger, C., León-Cruz, J. F., Galicia, L., & Manzo-Delgado, L. L. (2022). Dinámica espaciotemporal, causas y efectos de los megaincendios forestales en México. *Madera y Bosques*, 28(2), e2822453. <https://doi.org/10.21829/myb.2022.2822453>

- [8] Niu, C., Nair, D. J., Zhang, T., Dixit, V., & Murray-Tuite, P. (2022). Are wildfire fatalities related to road network characteristics? A preliminary analysis of global wildfire cases. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 80, 103217. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.103217>
- [9] Corona-Núñez, R. O., Li, F., & Campo, J. E. (2020). Fires Represent an Important Source of Carbon Emissions in Mexico. *Global Biogeochemical Cycles*, 34(12), e2020GB006815. <https://doi.org/10.1029/2020GB006815>
- [10] Loehman, R. A. (2020). Drivers of wildfire carbon emissions. *Nature Climate Change*, 10, 1070-1071. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-00922-6>
- [11] Keeley, J. E., & Syphard, A. D. (2019). Twenty-first century California, USA, wildfires: fuel-dominated vs. wind-dominated fires. *Fire Ecology*, 15, 24. <https://doi.org/10.1186/s42408-019-0041-0>
- [12] Van Wagner, C. E. (1987). Development and structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Canadian Forest Service. <https://cfs.nrcan.gc.ca/publications?id=19927>
- [13] Dimitrakopoulos, A. P., Bemmerzouk, A. M., & Mitsopoulos, I. D. (2011). Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment. *Meteorological applications*, 18(1), 83-93. <https://doi.org/10.1002/met.214>
- [14] Podschwit, H., Jolly, W., Alvarado, E., Verma, S., Ponce, B., Markos, A., Aliaga-Nestares, V., & Rodriguez-Zimmermann, D. (2022). Reliability of cross-regional applications of global fire danger models: a Peruvian case study. *Fire Ecology*, 18, 25. <https://doi.org/10.1186/s42408-022-00150-7>
- [15] Masinda, M. M., Li, F., Qi, L., Sun, L., & Hu, T. (2022). Forest fire risk estimation in a typical temperate forest in Northeastern China using the Canadian forest fire weather index: case study in autumn 2019 and 2020. *Natural Hazards*, 111, 1085-1101. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05054-4>
- [16] Copernicus Climate Change Service (2019). Fire danger indices historical data from the Copernicus Emergency Management Service [Base de datos]. <https://doi.org/10.24381/cds.0e89c522>
- [17] Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO] (2023). Portal de Geoinformación 2023 [Base de datos]. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- [18] Comisión Nacional Forestal [CONAFOR] (2021). Incendios 2015 a 2020 [Base de datos]. <https://snif.cnf.gob.mx/incendios/>
- [19] Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biayati, G., Bidlot, J., Bonavita, B., De Chiara, G., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>
- [20] Neger, C., Manzo, L., & Galicia, L. (2022). La investigación geográfica de los incendios forestales en México: una perspectiva bibliométrica y territorial. *Investigaciones Geográficas*, (108). <https://doi.org/10.14350/rig.60488>

- [21] Comisión Nacional Forestal [CONAFOR], & Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías [CONAHCYT] (2023). Sistema de Predicción de Peligro de Incendios Forestales (SPPIF). <http://forestales.ujed.mx/incendios2/#>
- [22] Vidal, R. (2007). Climas: Según sistema de clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García. En A. Coll-Hurtado (Ed.), *Nuevo atlas nacional de México* (hoja NA IV 13). Universidad Nacional Autónoma de México. [https://www.geografia.unam.mx/Geodig/nvo\\_atlas/index.html/5\\_naturaleza\\_ambiente/4\\_clima/NA\\_IV\\_13.jpg](https://www.geografia.unam.mx/Geodig/nvo_atlas/index.html/5_naturaleza_ambiente/4_clima/NA_IV_13.jpg)
- [23] León-Cruz, J. F., Pineda-Martínez, L. F., & Carbajal, N. (2022). Tornado climatology and potentially severe convective environments in Mexico. *Climate Research*, 87, 147-165. <https://doi.org/10.3354/cr01692>
- [24] Álvarez, C. A. (2021). Condiciones meteorológicas extremas e impacto ambiental causados por los vientos de Santa Ana en el noroeste de México y suroeste de EUA. [Tesis de doctorado, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica]. Repositorio IPICYT. <http://hdl.handle.net/11627/5650>
- [25] Álvarez, C. A., & Carbajal, N. (2019). Regions of influence and environmental effects of Santa Ana wind event. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12, 1019-1034. <https://doi.org/10.1007/s11869-019-00719-3>
- [26] Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO] (23 de junio 2020). Ecorregiones terrestres. <https://www.biodiversidad.gob.mx/region/ecorregiones>
- [27] Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI] (2018). Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional [Base de datos]. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>
- [28] Challenger, A., & Soberón, J. (2008). Los ecosistemas terrestres. En: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (Ed.), *Capital Natural de México*, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad. Ciudad de México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, p. 87-108.
- [29] Rodríguez, D. A. (2008). Fire Regimes, Fire Ecology, and Fire Management in Mexico. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 37(7), 548-556. <https://doi.org/10.1579/0044-7447-37.7.548>
- [30] Briones-Herrera, C. I., Vega-Nieva, D. J., Monjarás-Vega, N. A., Flores-Medina, F., Lopez-Serrano, P. M., Corral-Rivas, J. J., Carrillo-Parra, A., Pulgarin-Gámiz, M. A., Alvarado-Celestino, E., González-Cabán, A., Arrellano-Pérez, S., Álvarez-González, J. G., Ruiz-González, A. D., & Jolly, W. M. (2019). Modeling and Mapping Forest Fire Occurrence from Aboveground Carbon Density in Mexico. *Forests*, 10(5), 402. <https://doi.org/10.3390/f10050402>
- [31] Monjarás-Vega, N. A., Briones-Herrera, C. I., Vega-Nieva, D. J., Calleros-Flores, E., Corral-Rivas, J. J., López-Serrano, P. M., Pompa-García, M., Rodríguez-Trejo, D. A., Carrillo-Parra, A., González-Cabán, A., Alvarado-Celestino, E., & Jolly, W. M. (2020).

- Predicting forest fire kernel density at multiple scales with geographically weighted regression in Mexico. *Science of the Total Environment*, 718, 137313. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137313>
- [3132] Cartus, O., Kellndorfer, J., Walker, W., Franco, C., Bishop, J., Santos, L., & Fuentes, J. M. M. (2014). A National, Detailed Map of Forest Aboveground Carbon Stocks in Mexico. *Remote Sensing*, 6(6), 5559-5588. <https://doi.org/10.3390/rs6065559>
- [33] Vega-Nieva, D. J., Briseño-Reyes, J., Nava-Miranda, M. G., Calleros-Flores, E., López-Serrano, P. M., Corral-Rivas, J. J., Montiel-Antuna, E., Cruz-López, I., Cuahutle, M., Ressler, R., Alvarado-Celestino, E., González-Cabán, A., Jiménez, E., Álvarez-González, J. G., Ruiz-González, A. D., Burgan, R. E., & Preisler, H. K. (2018). Developing Models to Predict the Number of Fire Hotspots from an Accumulated Fuel Dryness Index by Vegetation Type and Region in Mexico. *Forests*, 9(4), 190. <https://doi.org/10.3390/f9040190>
- [34] Vega-Nieva, D. J., Nava-Miranda, M. G., Calleros-Flores, E., López-Serrano, P. M., Briseño-Reyes, J., López-Sánchez, C., Corral-Rivas, J. J., Montiel-Antuna, E., Cruz-López, M. I., Ressler, R., Cuahutle, M., Alvarado-Celestino, E., González-Cabán, A., Cortes-Montaño, C., Pérez-Salicrup, D., Jardel-Pelaez, E., Jiménez, E., Arrellano-Pérez, S., Álvarez-González, J. G., & Ruiz-González, A. D. (2019). Temporal patterns of active fire density and its relationship with a satellite fuel greenness index by vegetation type and region in Mexico during 2003-2014. *Fire Ecology*, 15, 28. <https://doi.org/10.1186/s42408-019-0042-z>
- [35] Galván, L., & Magaña, V. (2020). Forest fires in Mexico: An approach to estimate fire probabilities. *International Journal of Wildland Fire*, 29(9), 753-763. <https://doi.org/10.1071/WF19057>
- [36] Neger, C., & Manzo-Delgado, L. L. (2021). La evaluación de la gestión del riesgo de los incendios forestales en áreas naturales protegidas tropicales: el caso de la Reserva de la Biosfera Los Tuxtlas (México). *Cuadernos Geográficos*, 60(3), 95-128.
- [37] González-Gutiérrez, I., Mas-Causel, J. F., Morales-Manilla, L. M., & Ocegüera-Salazar, K. A. (2020). Thematic accuracy of hotspots and wildfires in Michoacán, Mexico. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 26(1), 17-35. <https://doi.org/10.5154/r.rchscfa.2019.01.011>
- [38] Farfán, M., Pérez-Salicrup, D. R., Flamenco-Sandoval, A., Nicasio-Arzeta, S., Mas, J.-F., & Ramírez, I. (2018). Modeling anthropic factors as drivers of wildfire occurrence at the Monarch Butterfly Biosphere. *Madera y Bosques*, 24(3), e2431591. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431591>
- [39] Vilchis-Francés, A. Y., Díaz-Delgado, C., Magaña-Lona, D., Bâ, K. M., & Gómez-Albores, M. Á. (2015). Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del Río Balsas. *Agrociencia*, 49(7), 803-820. <https://bit.ly/3H9ietb>
- [40] Thompson, M. P., Gannon, B. M., Caggiano, M. D. (2021). Forest roads and operational wildfire response planning. *Forests*, 12(2), 110. <https://doi.org/10.3390/f12020110>

- [41] Horton, P. (2022). Analogue methods and ERA5: Benefits and pitfalls. *International Journal of Climatology*, 42(7), 4078-4096. <https://doi.org/10.1002/joc.7484>
- [42] Téllez, O., Hutchinson, M. A., Nix, H. A., & Jones, P. (2011). En: G. Sánchez, C. Ballesteros, & N. P. Pavón (Eds.), *Desarrollo de coberturas digitales climáticas para México. Cambio Climático. Aproximaciones para el Estudio de su Efecto sobre la Biodiversidad*. Pachuca, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, p. 15-23.
- [43] Sample, M., Thode, A. E., Peterson, C., Gallagher, M. R., Flatley, W., Friggens, M., Evans, A., Loehman, R., Hedwall, S., Brandt, L., Janowiak, M., & Swanston, C. (2022). *Adaptation Strategies and Approaches for Managing Fire in a Changing Climate*. *Climate*, 10(4), 58. <https://doi.org/10.3390/cli10040058>
- [44] Andela, N., Morton, D. C., Giglio, L., Paugam, R., Chen, Y., Hantson, S., van der Werf, G. R., & Randerson, J. T. (2019). The Global Fire Atlas of individual fire size, duration, speed and direction. *Earth System Science Data*, 11, 11, 529-552, <https://doi.org/10.5194/essd-11-529-2019>



# 5

## **Contaminación atmosférica relacionada a la dispersión de polvo mineral en el Valle de México**

*Álvarez Báez, Christian Adrián*

Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C., San Luis Potosí, SLP.  
christian.alvarez813@gmail.com  
ORCID: 0000-0003-1600-1174

*Guevara Macías, María de Jesús*

Facultad de Agronomía y Veterinaria, Universidad Autónoma de San Luis, San Luis Potosí, SLP.  
guevara.macias@gmail.com ORCID: 0000-0001-7750-7211

*León-Cruz, José Francisco*

Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, México, jleon@geografia.unam.mx,  
ORCID: 0000-0002-0374-6858

Citar este capítulo: Álvarez-Báez, C., Guevara-Macías, M., León-Cruz, J.F. (2024). Contaminación por tormentas de polvo en el Valle de México. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales Hernández, J. C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim, México. Pp: 87 - 103.

### **Resumen:**

Cada año, tormentas de polvo y tolvánicas tienen lugar en México cuando las amplias regiones áridas y semiáridas del país, con suelos vulnerables a la erosión, son sometidas a vientos intensos. El impacto ambiental de las tormentas de polvo puede propagarse por cientos de kilómetros, lo que ha propiciado el grave deterioro de la calidad del aire en regiones urbanas del país. El material particulado emitido durante estos episodios ha sido asociado por diversos estudios con el aumento de hospitalización por problemas respiratorios en la población vulnerable. La investigación sobre las tormentas de polvo en México ha estado concentrada principalmente en el norte, sin embargo, la porción central del país ha sufrido, de forma cada vez más común, el impacto de estos fenómenos naturales. En este contexto, la presente investigación analiza dos eventos recientes

que afectaron el Valle de México: el 14 de marzo de 2021 y el 22 de mayo de 2022, los cuales impactaron significativamente la calidad del aire en una de las zonas urbanas más densamente pobladas del planeta. En ambos casos se estudiaron las condiciones meteorológicas que propiciaron el desarrollo de ambas tormentas de polvo, además de la emisión y dispersión del material particulado fino con diámetro menor a los  $10\ \mu\text{m}$  (PM<sub>10</sub>). Con este propósito se empleó el modelo atmosférico Weather Research and Forecasting con química acoplada (WRF-Chem). Los resultados permitieron cuantificar la dispersión de polvo mineral en zonas urbanas del Valle de México durante estas tormentas de polvo, evidenciando la vulnerabilidad y el impacto ambiental asociado con estas regiones densamente pobladas. Los resultados de esta investigación describen un panorama de riesgo bajo episodios de emisión de polvo masiva que debe ser considerado para establecer nuevas metodologías de alerta y prevención para la ciudadanía con mayor potencial de ser afectada.

Palabras clave: [WRF-Chem](#), [PM10](#), [simulación numérica](#), [contaminación](#).

Línea temática: [Pronóstico meteorológico y prevención de desastres](#).

## Introducción

Cada año durante la temporada de estiaje, en las regiones áridas y semiáridas del mundo, se generan tormentas de polvo [1]. El impacto del polvo en las áreas urbanas depende de la localización de las zonas altamente pobladas respecto de las fuentes de emisión y la dirección del viento [2]. A nivel mundial grandes ciudades alrededor de estas regiones se ven impactadas por la mezcla de los contaminantes y el polvo, disminuyendo los niveles de la calidad del aire [3]. Por ejemplo en China, en el periodo del 20 de marzo al 20 de abril de 2007 se monitoreó la trayectoria de diversas tormentas de polvo. Shanghai, una de las ciudades más densamente pobladas de este país, resultó afectada por el incremento de las concentraciones de polvo en el periodo de estudio, presentando picos de concentración hasta de  $1340.41\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  [3]. Durante marzo de 2021 las ciudades de Beijing, Shuzhou y Shijiazhuang en este mismo país, fueron impactadas por el incremento de PM<sub>10</sub> como consecuencia de las tormentas de polvo, los incrementos registraron valores de 7525, 3819 y 2992  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectivamente [4].

En los Estados Unidos de América las tormentas de polvo han sido más frecuentes en los últimos años. El polvo en esta región es uno de los principales agentes dispersores de enfermedades como la fiebre del valle. En coincidencia, el registro en la población afectada por dicha enfermedad también va en aumento [5]. México no está exento de los efectos de las tormentas de polvo por fenómenos extremos transportando grandes cantidades de polvo a las zonas urbanas fronterizas de Tijuana, Mexicali, Ensenada, San Diego y Los Ángeles con valores mayores de  $2000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$  de PM<sub>10</sub> rebasando en varios

periodos los máximos permitidos por las normas oficiales en las ciudades mexicanas [6]. En el centro del Valle de México también existen evidencias del desarrollo de tormentas de polvo, como consecuencia de la escasa cobertura vegetal del suelo en el ex-lago de Texcoco, así como en los campos arados en el este y sur de la ciudad. Aquí, las tormentas de polvo se desarrollan entre los meses de enero a mayo [7]. Registros históricos sobre las tormentas de polvo en la cuenca del Valle de México evidencian el desarrollo de dichos fenómenos tanto al inicio como al final de temporada seca [7].

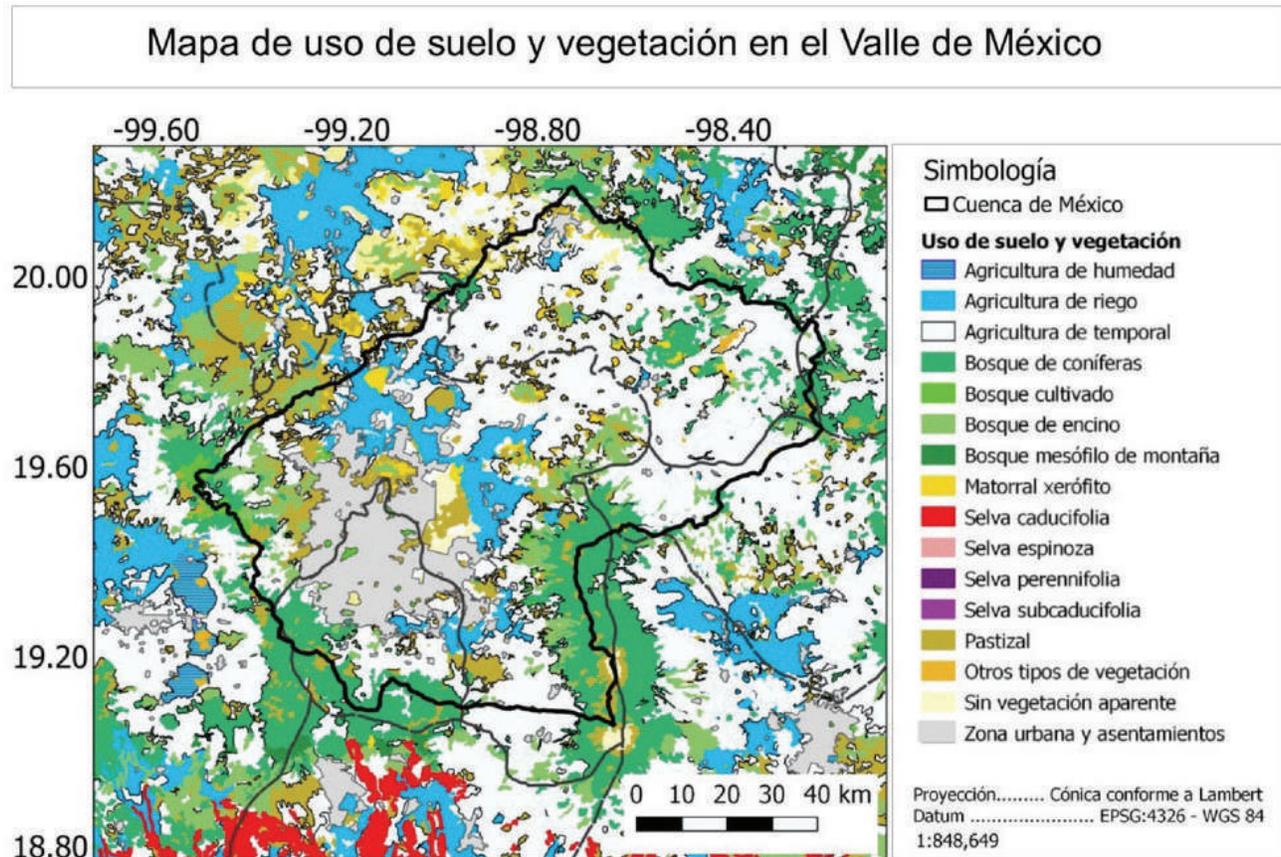
En este contexto, la presente investigación examina dos eventos recientes de tormentas de polvo que afectaron el Valle de México. Los eventos analizados fueron el 14 de marzo de 2021 y el 22 de mayo de 2022, los cuales afectaron significativamente la calidad del aire en una de las zonas urbanas más densamente pobladas del planeta. En ambos casos se estudiaron las condiciones meteorológicas que propiciaron el desarrollo de ambas tormentas de polvo, además de la emisión y dispersión del material particulado fino con diámetro menor a los 10  $\mu\text{m}$  ( $\text{PM}_{10}$ ). El objetivo principal de la investigación fue examinar y cuantificar la dispersión de polvo mineral en las zonas urbanas del Valle de México. Los resultados sirven como evidencia de la vulnerabilidad de estas regiones densamente pobladas ante amenazas socio-naturales, misma que debe ser considerada para establecer nuevas metodologías de alerta y prevención para la ciudadanía con mayor potencial de ser afectada.

## Datos y métodos

### Área de estudio

El Valle de México se localiza dentro de la provincia fisiográfica denominada Eje Volcánico. Dentro de esta se ubica la zona del lago de Xochimilco y las regiones semiáridas de Pachuca. La variación en la temperatura oscila entre los 18-20 °C, la precipitación media anual varía, desde los 600 mm/año en la zona seca, hasta los 1200 mm/año en las regiones más húmedas [8]. El Valle de México abarca alrededor de 7866 Km<sup>2</sup> y comprende por 16 delegaciones de la Ciudad de México, 59 municipios del Estado de México y un municipio del Estado de Hidalgo. La zona metropolitana del Valle de México actualmente tiene más de 20 millones habitantes [9] y el principal uso de suelo en el Valle de México es urbano (Figura 1).

**Figura 1. Mapa de Uso de suelo y vegetación en el Valle de México. Elaboración propia a partir de los datos de la Serie VI de Uso de Suelo y Vegetación, conjunto de datos vectoriales, escala 1:250 000. [10].**



## Configuración de modelo numérico

La modelación numérica de los eventos fue realizada empleando el modelo atmosférico Weather Research and Forecasting acoplado con un módulo químico (WRF-CHEM) en su versión 3.8.1. Éste consiste en un modelo tridimensional no hidrostático diseñado con el propósito del estudio de fenómenos atmosféricos y su predicción [11]. Además de simular los distintos procesos físicos atmosféricos, el acoplamiento del módulo químico permite la modelación de procesos relacionados con la dispersión y emisión de compuestos como el material particulado, aerosoles, entre otros [12]. Para el propósito del presente trabajo, el módulo químico fue empleado en la simulación de la emisión y dispersión de contaminantes relacionados con el polvo mineral y a su vez, a la formación de tormentas de polvo. Realizar las simulaciones requirió emplear datos de entrada para el modelo numérico en las fechas relevantes. Los datos procedentes de la base NCEP North American Mesoscale [13] fueron empleados cada 6 horas como forzamiento para la simulación del evento de marzo de 2021, mientras que los datos NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses [14] fueron empleados para el evento de mayo de 2022 debido a la falta de disponibilidad de datos adecuados procedentes de la base

NCEP North American Mesoscale para el segundo caso de estudio. Mediante diferentes experimentos de sensibilidad, se determinaron las configuraciones físicas y químicas óptimas para ambas simulaciones (Tabla1). Estas fueron centradas en las coordenadas 19.71°N y 99.20°O enfocadas en la parte central del Valle de México y se conformaron por 3 dominios, 2 anidados con resoluciones de 9, 3 y 1 km. La primera simulación comienza a las 00:00 UTC (18:00 hora local) del 13 de marzo y finaliza a las 00:00 UTC del 16 de marzo, mientras que la segunda simulación comienza a las 00:00 UTC del 21 de mayo y termina a las 00:00 UTC del 23 de mayo. Los datos geográficos estáticos más relevantes pueden ser consultados en la Tabla2. El índice de erodabilidad fue modificado para poder realizar el estudio de emisión de polvo en el Valle de México. Los resultados de las simulaciones fueron post-procesados y analizados empleando los lenguajes de programación NCAR Command Language (NCL) y Python con las librerías Netcdf4, geopandas, pandas, numpy, folium, scipy y folium.

**Tabla 1. Parametrizaciones físicas y químicas.**

Parámetro	Esquema
Microfísica	WRF Single-moment 3-class
Radiación de onda larga	Esquema RRTM
Radiación de onda corta	Esquema de Dudhia
Modelo de superficie	Unified Noah Land
Modelo para la capa límite planetaria	Esquema de Yonsei University
Modelo químico	GOCART aerosol module
Modelo de emisión de polvo	GOCART

**Tabla 2. Datos geográficos estáticos empleados.**

Parámetro	Base de datos
Uso de suelo y vegetación	Producto MODIS con resolución de 30'
Topografía	US Geological Survey con resolución de 30'

## Resultados

### Descripción de los eventos

En el caso del primer evento en marzo de 2021, los efectos de la dispersión de polvo mineral fueron reportados principalmente en zonas como Tultitlán y Cuautitlán Izcalli durante el día 14 de marzo. La dispersión fue causada por una racha de viento intensa cuyas consecuencias incluyeron, además, la caída de árboles, interrupción del suministro de energía eléctrica, afectaciones inmobiliarias, entre otras. Este evento contribuyó

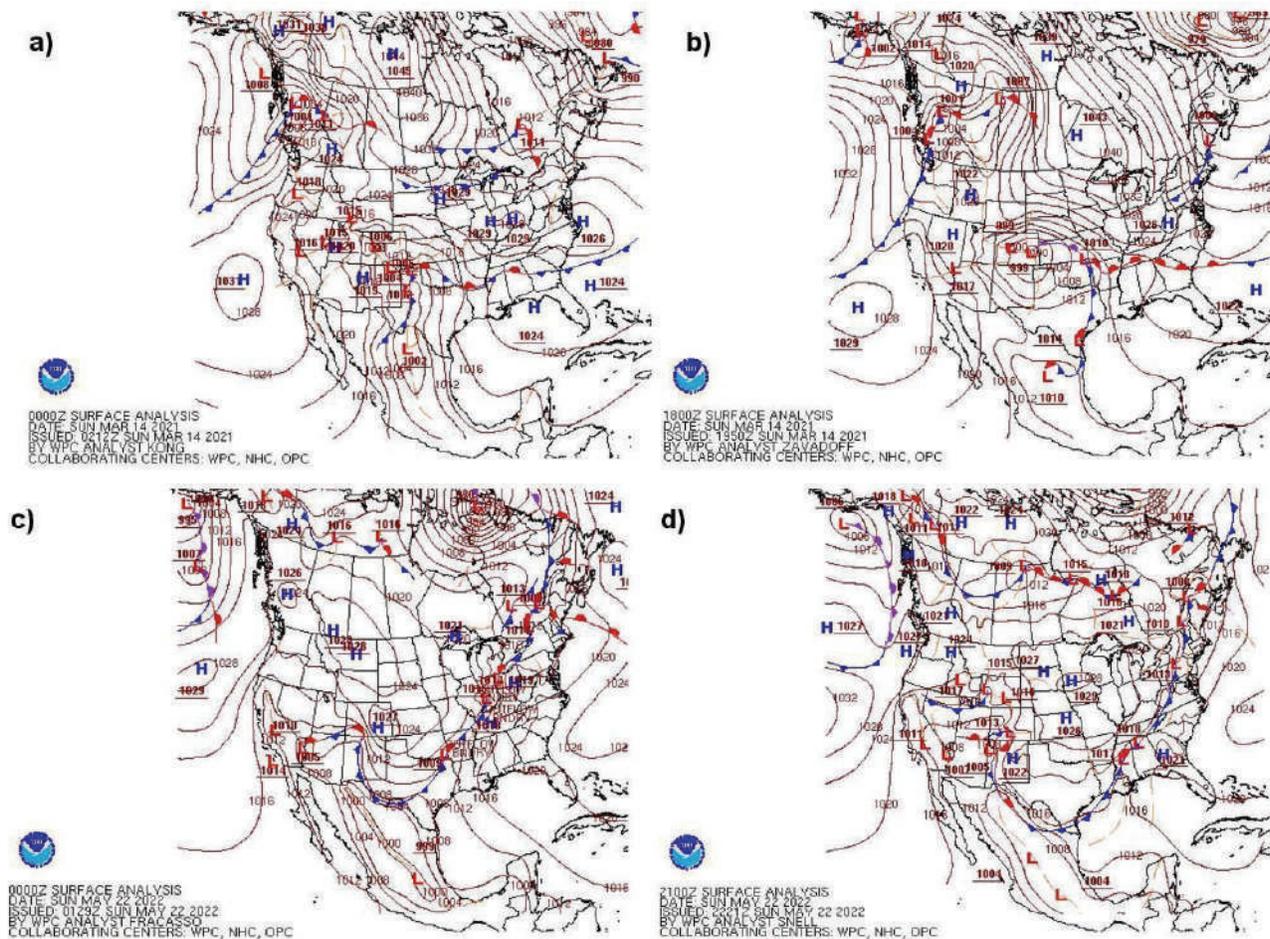
gravemente en el deterioro de la calidad del aire en zonas urbanas y también en la reducción de visibilidad, lo cual representó un riesgo importante para el tráfico aéreo y terrestre por varias horas continuas [15]. El segundo evento se desarrolló el 22 de mayo de 2022 aproximadamente a las 15:00 hora local, las rachas de viento registraron velocidades >30 km/h, aumentando las concentraciones de  $PM_{10}$  en el Valle de México. Las principales afectaciones derivadas de los fuertes vientos fueron cortes en el suministro de energía eléctrica. Para este evento se alertó a la población del desarrollo del evento y se pidió que se resguardaran al interior debido a los fuertes vientos y para evitar la exposición al polvo [16].

### Condiciones Sinópticas

Las condiciones sinópticas que dieron lugar al evento de marzo de 2021 fueron influenciadas por el sistema frontal No. 42 de la temporada asociado a un vórtice de núcleo frío [17]. Los efectos comúnmente asociados con el paso de un sistema frontal, fueron observados principalmente en el norte del país, con el descenso de temperatura y precipitación. Sin embargo, los remanentes de este sistema alcanzaron latitudes inferiores en el centro de México. Se observó el incremento de la intensidad del viento en las regiones al norte del Valle de México durante el 14 de marzo con un punto álgido en la máxima penetración del sistema a las 18:00 UTC (Figura 2a y Figura 2b). Probablemente la topografía compleja del centro del país influyera en las velocidades alcanzadas por el viento, por medio de la canalización, promoviendo la emisión de polvo mineral.

El evento de mayo de 2022 se asocia a la interacción de diferentes factores. El 21 de mayo el frente frío No. 47 ingresó por la parte norte del país, interactuando con un canal de baja presión que se extendía desde el norte hasta el centro [18]. Mientras esta interacción produjo lluvias puntuales en los estados del norte del país, el centro de México experimentó un incremento de intensidad de viento generalizado que se vio acentuado por la canalización a causa de la topografía compleja presente en la región, principalmente durante el día 22 de mayo (Figura 2c y Figura 2d). El canal de baja presión en el centro de México produjo una región de convergencia que causó esta circulación sobre regiones áridas, provocando así la emisión de polvo mineral y su transporte en la atmósfera baja del Valle de México.

**Figura 2.** Cartas sinópticas en superficie del 14 de marzo de 2021 a las a) 00:00 y b) 18:00 UTC, y del 22 de mayo de 2022 a las c) 00:00 y d) 21:00 UTC. Fuente, WPS [19].

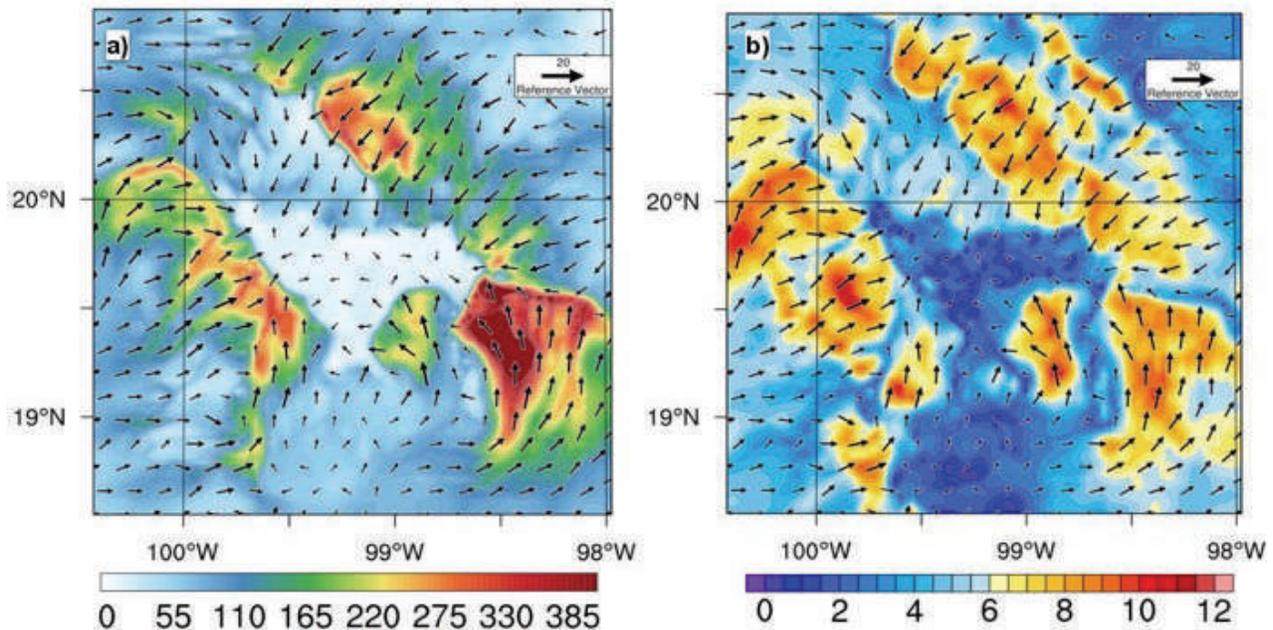


## Simulaciones Numéricas

### Evento de marzo de 2021

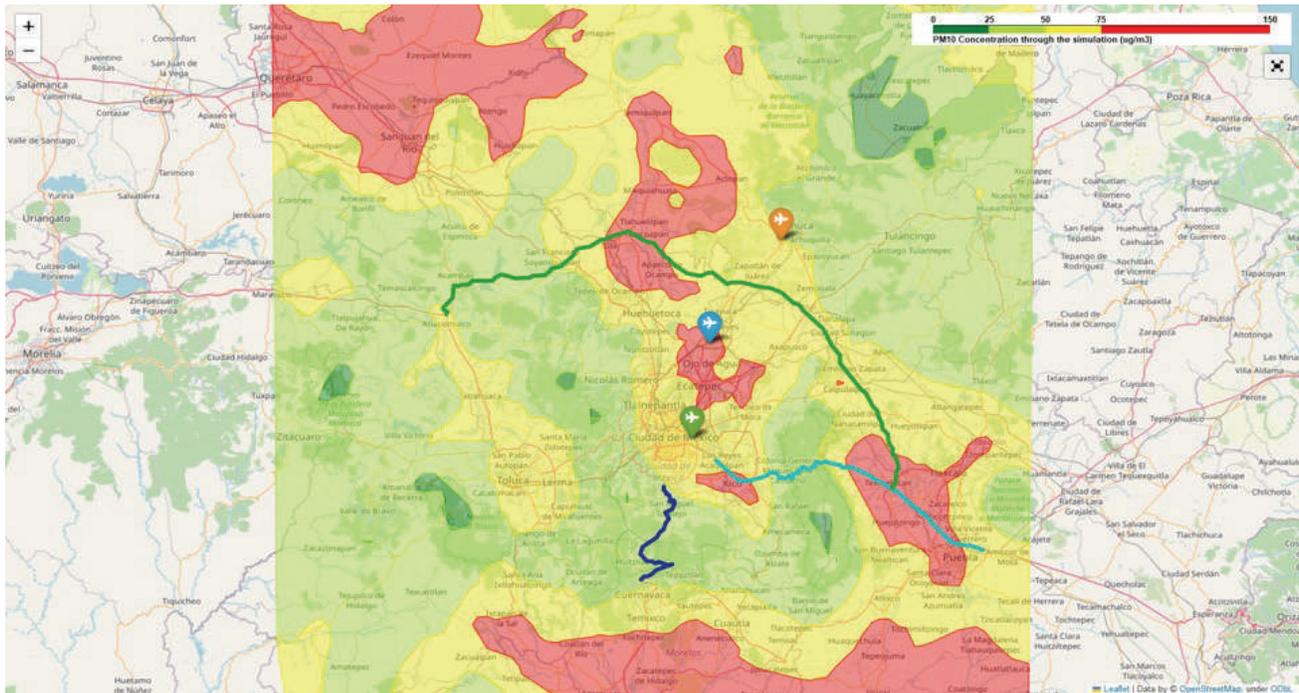
El día del evento, 14 de marzo, es precedido por un día de baja intensidad de viento. Durante el 13 de marzo, la intensidad de viento en el Valle de México no superó los 5 m/s, hasta que los remanentes del sistema frontal alcanzaron el área de estudio gradualmente el 14 de marzo. Conforme el sistema frontal alcanzaba latitudes menores, la velocidad del viento aumentó dentro del Valle de México, donde el viento fue canalizado y acelerado sobre regiones áridas durante las últimas horas del día (Figura 3). La intensidad del viento alcanzó la magnitud suficiente para la emisión de polvo mineral y  $PM_{10}$  desde regiones áridas susceptibles a la erosión eólica en las últimas horas del 13 de marzo, lo cual continuó a lo largo del día 14 de marzo (Figura 3a). De acuerdo a la simulación, este episodio deterioró severamente la calidad del aire en las regiones pobladas del Valle de México, con concentraciones de  $PM_{10}$  oscilando entre los  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  con un origen remoto.

**Figura 3.** Gráficas el 14 de marzo a las 23:00 UTC de a) concentración de PM<sub>10</sub>  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  en superficie y b) intensidad de viento (m/s) en superficie. Vector de referencia de 20 m/s. Fuente: Elaboración Propia.

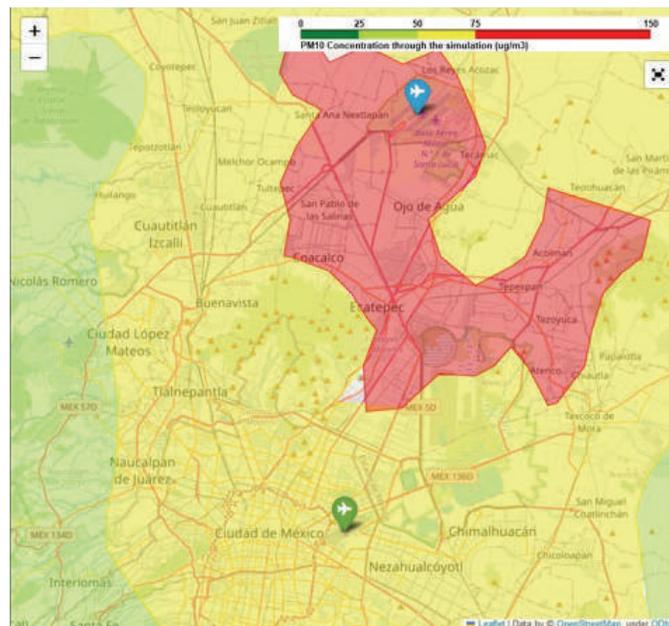


Cabe mencionar que de acuerdo con los estándares de México, el límite permisible diario para concentración de PM<sub>10</sub> es de  $75\mu\text{g}/\text{m}^3$  [20]. La Figura 4 permite conocer el promedio de concentración de PM<sub>10</sub> durante los 3 días del evento simulado, la cual muestra a su vez, las áreas más afectadas de la región urbana del Valle de México. Gran parte del área de estudio se encuentra cerca de superar los límites permisibles (color amarillo en Figura 4) y una considerable área mantuvo un valor promedio superior a los  $75\mu\text{g}/\text{m}^3$  durante los 3 días de la simulación (color rojo en Figura 4). Las zonas urbanas de Cuautitlán Izcalli, Tlalnepantla, Naucalpan, Chimalhuacán y la Ciudad de México, se mantuvieron con un riesgo elevado de alcanzar concentraciones de PM<sub>10</sub> superiores al límite permisible, afectando también el Aeropuerto Internacional de la Ciudad de México (AICM). Las regiones pobladas de Ecatepec, Coacalco, Nextlalpan, entre otras, al norte de la Ciudad de México, sí alcanzaron valores promedio que oscilan entre  $75\mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ , lo cual es particularmente relevante, puesto que en esta zona se encuentra el Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles (AIFA) (Figura 5). Otras áreas más al norte del Valle de México también fueron afectadas de la misma manera. Cabe mencionar que otras regiones fuera del Valle de México mostraron concentraciones promedio de PM<sub>10</sub> muy por encima de los límites establecidos. Entre estas regiones se encuentran municipios del estado de Querétaro, Tlaxcala y Puebla. Los resultados muestran concentraciones promedio cercanas y por encima del límite establecido en autopistas densamente concurridas como la autopista Arco Norte y la autopista México-Puebla, lo cual es de suma relevancia para la visibilidad del tráfico de alta velocidad.

**Figura 4.** Concentración de PM10 promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el evento de marzo de 2021. Ícono verde: Aeropuerto Internacional de Ciudad de México, ícono azul: Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles, ícono naranja: Aeropuerto Nacional Ing. Juan Guillermo Villasana. Línea verde: Autopista Arco Norte, línea azul celeste: Autopista México - Puebla, línea azul oscuro: Carretera México-Cuernavaca. Fuente: Elaboración Propia.



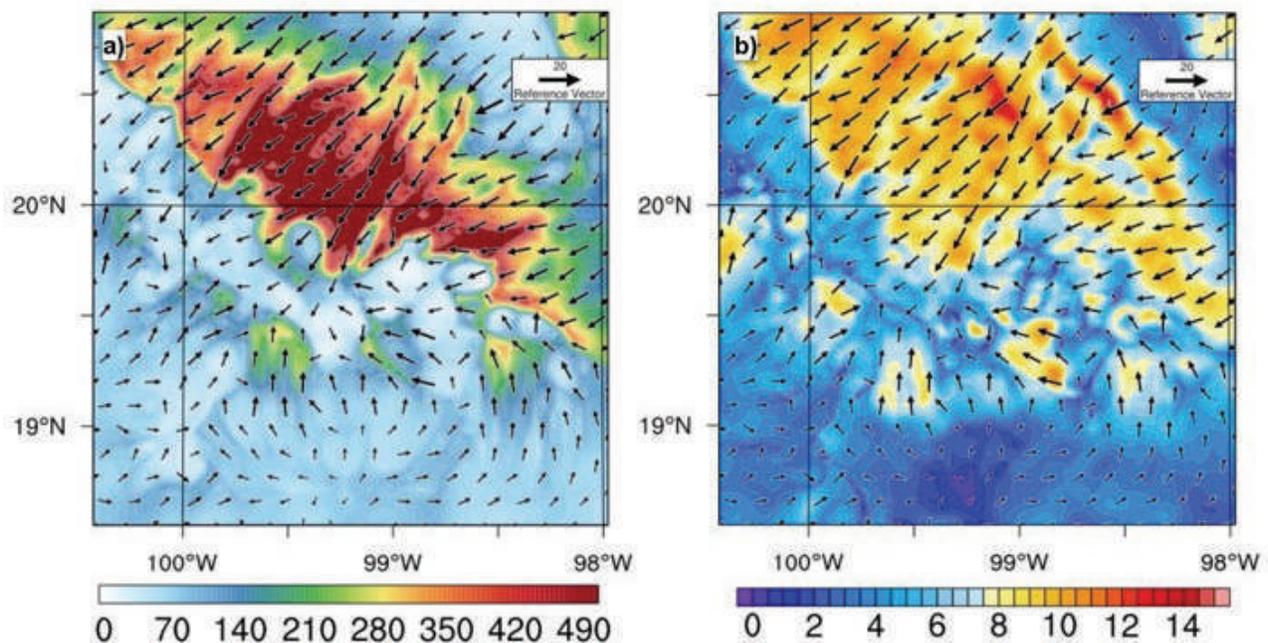
**Figura 5.** Concentración de PM10 promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el evento de marzo de 2021. Ícono verde: Aeropuerto Internacional de Ciudad de México, ícono azul: Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles. Fuente: Elaboración Propia.



## Evento de mayo de 2022

El día 21 de mayo, la intensidad del viento en el Valle de México osciló entre 0 m/s y 6 m/s sin una dirección dominante de acuerdo con la simulación. El día 22 de mayo presentó magnitudes similares hasta las 19:00 UTC cuando la dirección del viento se volvió predominantemente hacia el suroeste con una intensidad superior a los 8 m/s promoviendo así la erosión eólica de las regiones vulnerables (Figura 6). Esta situación cambió durante el día 23 de mayo, en el cual las condiciones de viento regresaron a su estado previo de baja intensidad. La llegada de vientos intensos desde el noreste con magnitud superior a los 10 m/s marca el inicio de la emisión de importantes cantidades de polvo mineral y  $PM_{10}$  a las 19:00 UTC del 22 de mayo que eleva las concentraciones de  $PM_{10}$  por encima de los  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , principalmente en la parte norte del área de estudio (Figura 6a). Al igual que en el evento de marzo de 2021, el episodio de mayo de 2022 representó una amenaza a la salud de los habitantes de las zonas urbanas del Valle de México, siendo expuestas a concentraciones de  $PM_{10}$  de hasta  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  y  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

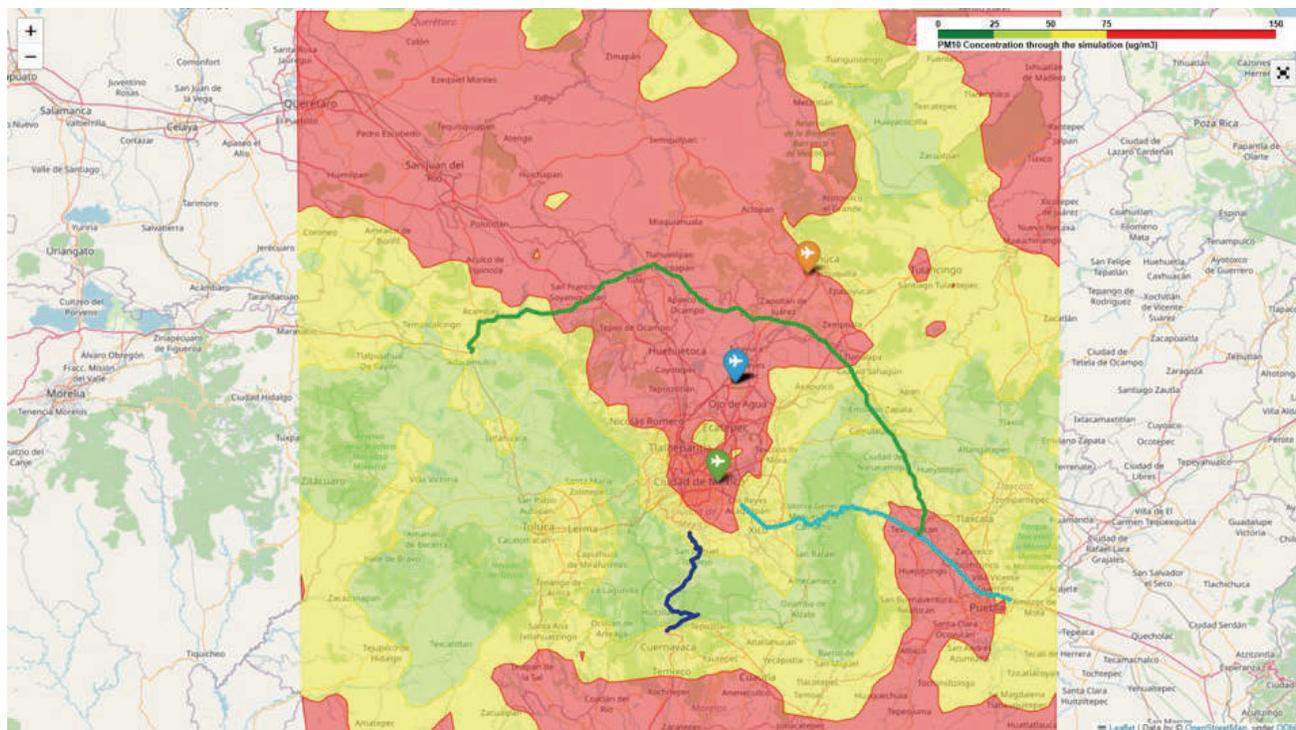
**Figura 6.** Gráficas del 22 de mayo a las 22:00 UTC de a) concentración de  $PM_{10} \mu\text{g}/\text{m}^3$  en superficie y b) intensidad de viento (m/s) en superficie. Vector de referencia de 20 m/s. Fuente: Elaboración Propia.



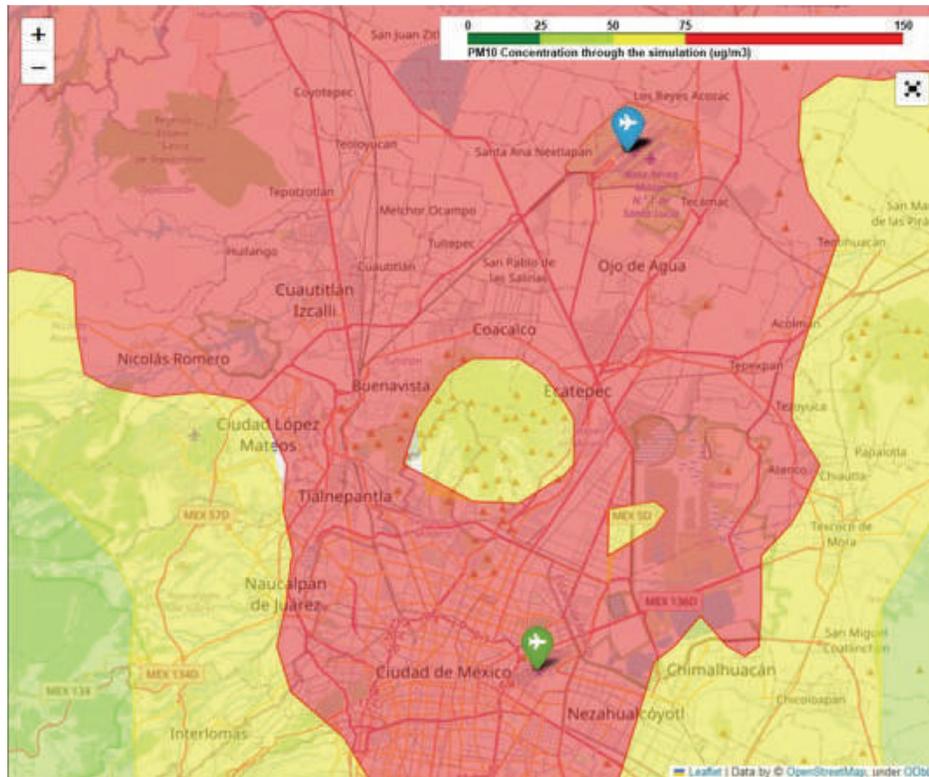
El análisis de la concentración de  $PM_{10}$  promedio en el área de estudio durante el evento de mayo de 2022, permite reconocer que este episodio fue aún más intenso y perjudicial para la calidad del aire del Valle de México que el evento de marzo de 2021. Una gran parte de esta región se encontró bajo concentraciones de  $PM_{10}$  superiores a los límites permitidos por las normas de salud (Figura 7). Los habitantes de la mayoría del área de la Ciudad de México, junto con otras zonas densamente pobladas del Valle de México como

Cuautitlán Izcalli, Tlalnepantla, Naucalpan, Coacalco y Ecatepec se encontraron bajo condiciones nocivas durante este evento (Figura 8). La dispersión de polvo mineral y  $PM_{10}$  nuevamente afectó al AICM y al AIFA. El impacto ambiental también alcanzó regiones más al norte del Valle de México, afectando incluso al aeropuerto nacional Ing. Juan Guillermo Villasana en Pachuca, Hidalgo. Las regiones con concentraciones de  $PM_{10}$  por encima de la norma incluyen zonas urbanas fuera del Valle de México, como algunos municipios de los estados de Querétaro, Puebla y Tlaxcala. Cabe mencionar que las altas concentraciones de  $PM_{10}$  en este evento, sugieren que las regiones áridas circundantes se encontraron bajo un intenso deterioro por erosión eólica, aún mayor que el episodio de marzo de 2021. La dispersión del polvo mineral volvió a afectar autopistas de alta velocidad y con tráfico concurrido, como la autopista Arco Norte, la autopista México-Puebla y también la carretera 57, lo que pudo tener un impacto negativo en la visibilidad.

**Figura 7. Concentración de  $PM_{10}$  promedio ( $\mu g/m^3$ ) durante el evento de mayo de 2022. Ícono verde: Aeropuerto Internacional de Ciudad de México, ícono azul: Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles, ícono naranja: Aeropuerto Nacional Ing. Juan Guillermo Villasana. Línea verde: Autopista Arco Norte, línea azul celeste: Autopista México - Puebla, línea azul oscuro: Carretera México - Cuernavaca. Fuente: Elaboración Propia.**



**Figura 8. Concentración de PM10 promedio ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) durante el evento de mayo de 2022. Ícono verde: Aeropuerto Internacional de Ciudad de México, ícono azul: Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles. Fuente: Elaboración Propia.**



## Discusión

Los resultados de esta investigación muestran la dispersión de dos tormentas de polvo en dos años seguidos sobre el Valle de México. Sin embargo, no se puede asumir que estos sean los únicos dos eventos que se hayan presentado ni tampoco se puede deducir la frecuencia de fenómenos de este tipo en el Valle de México puesto que aún no existe un estudio estadístico que responda a estas preguntas. Es conocido que, debido a la alta densidad de vehículos en la zona, los estudios de contaminantes atmosféricos naturalmente se concentran en los aerosoles de carácter invernal. Sin embargo, la identificación de episodios de tormentas de polvo, como los investigados en este trabajo, además de los reportes por los medios sobre presencia en suspensión de material particulado y polvo mineral en zonas residenciales y autopistas, indica que esta región puede estar sometida a la influencia de tormentas de polvo con una mayor frecuencia de la que se tiene conocimiento (Figura 9). Lo anterior resulta en un nuevo factor contaminante con repercusiones en la salud para los habitantes del Valle de México.

El deterioro extremo de la calidad por causa de las tormentas de polvo, es un fenómeno que ya ha sido observado y estudiado en otras regiones del país por medio de simulación numérica [21, 6, 22], sin embargo, no ha sido investigado en una de las regiones más

pobladas del planeta. La repercusión de las tormentas de polvo en la salud de las personas es un tema respaldado por numerosos estudios desarrollándose aún en la actualidad concentrados en zonas densamente pobladas. Las tormentas de polvo han demostrado tener el potencial para afectar gravemente a la población más vulnerable como aquellos mayores de 65 años, las personas con problemas respiratorios crónicos y también los menores de edad [23]; incluso, existen estudios que han encontrado la presencia de patógenos en el polvo mineral emitido durante tormentas de polvo en las fronteras de México [24]. El Valle de México concentra a más de 20 millones de habitantes, lo que representa el 17% de la población de todo el país [9], por lo que esta alta densidad demográfica puede encontrarse bajo condiciones nocivas a los episodios similares a los ya descritos. Otra consecuencia importante de las tormentas de polvo es la súbita reducción de visibilidad. Este fenómeno se ha relacionado directamente con el aumento de accidentes vehiculares durante tormentas de polvo, además de retrasos, desvíos y cancelación de vuelos en los aeropuertos afectados [25]. Los resultados de esta investigación mostraron que estas condiciones pudieron darse también en el Valle de México, afectando a autopistas altamente concurridas y de alta velocidad. Entre ellas está la autopista Arco Norte o la autopista México-Puebla, la cual por sí sola registra más de 64 mil cruces diarios [26], los cuales podrían verse afectados por la reducción de visibilidad durante eventos de esta naturaleza. Esto fue reportado en otras regiones al sur del área de estudio durante la tormenta de polvo de mayo de 2022, donde la alta concentración de polvo mineral redujo drásticamente la visibilidad deteniendo el tráfico por completo en la carretera México-Cuernavaca. De la misma forma, de acuerdo a los resultados, aeropuertos de la región también son vulnerables a la reducción de la visibilidad por tormentas de polvo, esto incluye los aeropuertos internacionales de alto tráfico aéreo como el AIFA y el AICM. En este sentido, durante el evento de mayo de 2022 se tomaron video de los estragos de altas cantidades de polvo en suspensión afectando las actividades del AICM. (Figura 10).

**Figura 9. Captura de Ciudad de México el 22 de mayo de 2022. Fuente: [27].**



**Figura 10. Capturas del Aeropuerto Internacional de Ciudad de México el 22 de mayo de 2022. Fuente: [27]** Capturas del Aeropuerto Internacional de Ciudad de México el 22 de mayo de 2022. Fuente: [27].



Mientras ya existen medidas para combatir la contaminación por aerosoles emitidos por vehículos e industrias relacionadas con el  $\text{CO}_2$ , no se cuenta con estrategias para mitigar el impacto de las tormentas de polvo y mucho menos de los índices correspondientes para diseñar alertas que permitan a la población prepararse. Es por esta situación que es necesario un mayor estudio del impacto ambiental en el Valle de México por causa de tormentas de polvo de las regiones circundantes. También, la existencia de eventos registrados por dispersión de polvo mineral en el Valle de México, indica que las regiones circundantes se encuentran bajo condiciones intensas de erosión eólica, sugiriendo el desarrollo de procesos de desertificación eólica y deterioro de suelo que deben ser investigados.

## Conclusiones

La investigación realizada comprende la simulación numérica de dos eventos de tormentas de polvo centradas en la zona densamente poblada del Valle de México. De acuerdo con los resultados, tanto el evento de marzo de 2021 como el de mayo de 2022, representaron un impacto ambiental apreciable en la región por medio del deterioro de la calidad del aire y la reducción de la visibilidad. Un análisis geoespacial de las concentraciones promedio de  $\text{PM}_{10}$  durante ambos eventos reveló que grandes áreas densamente pobladas se encontraron expuestas a concentraciones superiores a los límites establecidos por las normas oficiales, afectando potencialmente a la población vulnerable como la gente mayor, los menores de edad y las personas con problemas respiratorios crónicos. La dispersión de polvo mineral y la súbita reducción de visibilidad también puso en riesgo aeropuertos internacionales con alta densidad de tráfico aéreo como el AICM y el AIFA. La visibilidad del tráfico terrestre también fue severamente afectada en autopistas de alta velocidad como la autopista Arco Norte y la carretera México - Puebla. Debido a

la alta densidad demográfica que existe en el Valle de México, las tormentas de polvo y las tolvaneras pueden interrumpir en las actividades diarias de la zona urbana, además de poner en riesgo a la población vulnerable. Las posibles consecuencias socioeconómicas de esta clase de fenómenos en una región conurbada de esta magnitud, requieren de una mayor investigación para determinar los alcances. De esta manera se puede llegar a nuevas estrategias para mitigar los efectos de las tormentas de polvo y las tolvaneras en la zona. El margen de estudio es aún muy amplio en lo que respecta al impacto ambiental del desarrollo de tormentas de polvo en el Valle de México.

## Referencias

- Goudie, A. S., & Middleton, N. J. (1992). The changing frequency of dust storms through time. *Climatic Change*, 20(3), 197-225. doi:10.1007/bf00139839
- Goudie, A. S. (2014). Desert dust and human health disorders. *Environment international*, 63, 101-113.
- Huang, K., Zhuang, G., Li, J., Wang, Q., Sun, Y., Lin, Y., & Fu, J. S. (2010). Mixing of Asian dust with pollution aerosol and the transformation of aerosol components during the dust storm over China in spring 2007. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115(D7). <https://doi.org/10.1029/2009JD013145>
- Zhang, T., Zheng, M., Sun, X., Chen, H., Wang, Y., Fan, X., ... & Chai, F. (2023). Environmental impacts of three Asian dust events in the northern China and the northwestern Pacific in spring 2021. *Science of The Total Environment*, 859, 160230.
- Tong, D. Q., Wang, J. X. L., Gill, T. E., Lei, H., & Wang, B. (2017). Intensified dust storm activity and Valley fever infection in the southwestern United States. *Geophysical Research Letters*, 44(9), 4304-4312. doi:10.1002/2017gl073524
- Álvarez, C.A., Carbajal, N. & Pineda-Martínez, L.F. (2022). Dust pollution caused by an extreme Santa Ana wind event. *Nat Hazards* 110, 1427-1442 . <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04996-z>
- Jáuregui, E. (1989). The dust storms of Mexico City. *International Journal of Climatology*, 9(2), 169-180. doi:10.1002/joc.3370090205 [doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0195](https://doi.org/10.4209/aaqr.2020.05.0195)
- INEGI (2017). Anuario estadístico y geográfico de México 2017. Gobierno del Estado de México, INEGI.
- OECD (2015), OECD Territorial Reviews: Valle de México, México, OECD Publishing, Paris. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1787/9789264245174-en>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) (2015). Carta de uso de suelo y vegetación. Datos vectoriales. Escala 1:250 000 serie VI.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D., Duda, M. G., ... Powers, J. G. (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3 (No. NCAR/TN-475+STR). University Corporation for Atmospheric Research. doi:10.5065/D68S4MVH

- Grell, G. A., Peckham, S. E., Schmitz, R., McKeen, S. A., Frost, G., Skamarock, W. C., & Eder, B. (2005). Fully coupled "online" chemistry within the WRF model. *Atmospheric environment*, 39(37), 6957-6975.
- NCEP NAM (2021) National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce. 2015, updated daily. NCEP North American Mesoscale (NAM) 12 km Analysis. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/G4RC-1N91>
- NCEP FNL (2022) National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/U.S. Department of Commerce (2000, updated daily) NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>.
- "Tormenta de polvo azota Coacalco, Edomex; vecinos reportan apagones". *Heraldo de México*, Marzo 15, 2021. <https://heraldodemexico.com.mx/nacional/2021/3/14/tormenta-de-polvo-azota-coacalco-edomex-vecinos-reportan-apagones-video-270107.html>
- "Activaron alerta amarilla por fuertes vientos y tolvaneras en el Valle de México" *Infobae*, Mayo 22, 2022 <https://www.infobae.com/america/mexico/2022/05/22/fuertes-vientos-y-tolvaneras-se-presentaron-en-el-valle-de-mexico-asi-fueron-las-reacciones-en-redes-sociales/>
- Sistema Meteorológico Nacional (2021) Reporte del clima en México, Marzo 2021. <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Marzo21.pdf>
- Sistema Meteorológico Nacional (2022) Reporte del clima en México, Mayo 2022. SMN 2022 <https://smn.conagua.gob.mx/tools/DATA/Climatolog%C3%ADa/Diagn%C3%B3stico%20Atmosf%C3%A9rico/Reporte%20del%20Clima%20en%20M%C3%A9xico/RC-Mayo22.pdf>
- Weather Prediction Center & National Weather Service. (2022). WPC Surface Analysis Archive. Weather Prediction Center. Retrieved November 3, 2022, from [https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web\\_pages/sfc/sfc\\_archive.php](https://www.wpc.ncep.noaa.gov/archives/web_pages/sfc/sfc_archive.php)
- NOM-025-SSA1-2014, NORMA Oficial Mexicana Salud ambiental. Valores límite permisibles para la concentración de partículas suspendidas PM10 y PM2.5 en el aire ambiente y criterios para su evaluación.
- Álvarez, C. A., & Carbajal, N. (2019). Regions of influence and environmental effects of Santa Ana wind event. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12, 1019-1034.
- Guevara-Macías, M., Pineda-Martínez, L. F., & Carbajal, N. (2023). A descriptive study of dust storms and air quality in a semi-arid region of Mexico. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 1-16.

- Schweitzer MD, Calzadilla AS, Salamoá, O., Sharific, A., Kumard, N., Holta, G., Camposa, M., Mirsaeidia, M. (2018). Lung health in era of climate change and dust storms. *Environ Res* 163:36-42
- Lauer, A., Etyemezian, V., Nikolich, G., Kloock, C., Arzate, AF., Sadiq Batcha, F., Kayes Passaglia, A. (2020). Valley fever: environmental risk factors and exposure pathways deduced from field measurements in California. *Int J Environ Res Public Health*. <https://doi.org/10.3390/ijerph17155285>
- Middleton, N., Kashani, S. S., Attarchi, S., Rahnama, M., & Mosalman, S. T. (2021). Synoptic Causes and Socio-Economic Consequences of a Severe Dust Storm in the Middle East. *Atmosphere*, 12(11), 1435. MDPI AG. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.3390/atmos12111435>
- "Autopista México-Puebla registra 65 mil cruces de automóviles al día: AMTM". Milenio, Noviembre 15, 2021. <https://www.milenio.com/politica/comunidad/autopista-mexico-puebla-registra-65-mil-cruces-autos-amt>
- "CDMX registra intensa tolvanera; tira árboles, postes y un tapial". Excélsior, Mayo 22, 2022. <https://www.excelsior.com.mx/comunidad/cdmx-registra-intensa-tolvanera-reportan-caida-de-arboles-y-postes/1516591>



# 6

## **Zonificación del riesgo ante la escasez hídrica en cuencas de la costa occidente de México**

*Rivera García, Jonathan Ernesto*

Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa, Maestría en Ciencias en Geofísica, Laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad. Puerto Vallarta, Jalisco, México. jonatan.rivera7773@alumnos.udg.mx  
Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-4899-9090>

*Sanchez Casanova, Dennis*

Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa, Maestría en Ciencias en Geofísica, Laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad. Puerto Vallarta, Jalisco, México. dennis.sanchez@alumnos.udg.mx Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-8746-8030>

*Cruz Romero, Bartolo*

Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa, Laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad. UDG-CA-1014. Puerto Vallarta, Jalisco, México. bartolo.cruz@academicos.udg.mx Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2981-0301>

*Téllez López, Jorge*

Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa, Laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad. UDG-CA-1014. Puerto Vallarta, Jalisco, México. jorge.tlopez@academicos.udg.mx Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-2313-7400>

*Carrillo González, Fátima Maciel*

Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa. UDG-CA-1014. Puerto Vallarta, Jalisco, México. fatima.carrillo@academicos.udg.mx Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-9280-4476>

*Morales Hernández, Julio César*

Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa. Puerto Vallarta, Jalisco, México. julio.morales@academicos.udg.mx Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9932-6945>

Citar este capítulo: Rivera García, J. E., Sánchez Casanova, D., Cruz Romero, B., Téllez López, J., Carrillo González, F. M y Morales Hernández, J.C. (2024). Zonificación del riesgo ante la escasez hídrica en cuencas de la costa occidente de México. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales Hernández, J. C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero, - REDEScim, México. Pp: 105 - 119.

## Resumen:

Por su ubicación geográfica y características naturales, México presenta vulnerabilidad alta ante las sequías, sobre todo en la región centro y norte del país; esta condición natural de falta de agua en conjunto con una mala gestión del recurso, provoca condiciones de escasez hídrica. Que ocurre cuando la demanda supera a la disponibilidad o cuando no existen condiciones de accesibilidad al recurso vital; sin embargo, el calentamiento global y el crecimiento de la población son factores que repercuten y amplifican la condición de escasez. En el occidente de México, esta condición de escasez año con año se presenta con mayor frecuencia, provocando afectaciones sociales y económicas en la región; y al tratarse de un fenómeno multifactorial; para este estudio, se propone el empleo del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) con la finalidad de determinar las zonas de mayor vulnerabilidad ante la escasez hídrica, considerando aspectos ambientales y socio económicos que tienen influencia sobre el fenómeno. Los resultados muestran que la vulnerabilidad alta ante la escasez hídrica, se extiende en un total de 10,335 ha, el equivalente a 1.41% del territorio, misma que se asocia principalmente a los sectores agrícola y ganadero que se desarrollan de forma intensiva en la región centro costa, principalmente en los límites del municipio de Tomatlán. Si bien es cierto que las proporciones de vulnerabilidad alta son bajas en comparación con la escala de estudio, dicha categoría podría incrementarse en extensión; sin embargo, el acercamiento realizado representa un fundamento técnico académico para la toma de decisiones y las bases para el planteamiento de planes y programas que busquen combatir y mitigar los efectos de la escasez, al exponer las zonas y los factores de mayor influencia sobre el fenómeno y cómo cada causa puede ser abordada.

Palabras clave: **Multifactorial, estrés hídrico, espacialización.**

Línea temática: 1. Diagnóstico y análisis de procesos.

## Introducción

La escasez de agua es un concepto relativo y dinámico que puede presentarse en cualquier nivel de suministro o demanda, considerado como un fenómeno de carácter natural, debido a la variabilidad hidrológica que presentan ciertas regiones; sin embargo, los modelos existentes de gestión, uso, planificación y políticas económicas del agua lo vuelven un fenómeno de construcción social, debido a la intervención humana sobre el ciclo hidrológico (FAO, 2013; UNESCO, 2015).

La escasez hídrica se presenta cuando la demanda por el recurso hídrico excede la disponibilidad, las razones de la escasez pueden ser distintas; sin embargo, son tres los

aspectos principales que caracterizan la escasez: 1) La falta física de agua para satisfacer la demanda, 2) El nivel de desarrollo de la infraestructura que controla el acceso, almacenamiento y distribución del recurso y 3) La capacidad institucional para gestionar el recurso hídrico (FAO, 2013; UNICEF, 2021).

Actualmente 1.42 miles de millones de personas viven en áreas con vulnerabilidad hídrica alta o extremadamente alta (UNICEF, 2021); de acuerdo con el último informe del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) los peligros relacionados con el agua, han incrementado en frecuencia, duración y magnitud; consecuencia del calentamiento global incrementando hasta 15 veces el número de víctimas mortales por fenómenos relacionados con el agua, como las inundaciones, sequías y tormentas (IPCC, 2023).

Particularmente, México es un país vulnerable ante las sequías en el 52% de su territorio, afectando 14 estados, registrando para el 2021 un total de 8,491 sequías, de las cuales 250 fenómenos se caracterizaron como excepcionales y presentaron escasez total de agua en embalses, ríos y arroyos (IMCO, 2023b). De acuerdo con datos del Banco Mundial en México para el año de 1960, la disponibilidad promedio anual per cápita era de 10,000 m<sup>3</sup>, mientras que para el 2012, la disponibilidad era de 4,000 m<sup>3</sup>, esperando que la disponibilidad para el 2030 se reduzca a 3,000 m<sup>3</sup> por habitante, sobre todo en las regiones centro y norte del país (IMCO, 2023a).

De acuerdo con el Monitor de sequía de México de la Comisión Nacional del Agua, para marzo del 2023 el 49.85% de los municipios de México (1,232) presentaron sequías moderadas y excepcionales, siendo Jalisco uno de los ocho estados más secos del país en conjunto con los estados de Coahuila, Aguascalientes, Colima, Durango, Zacatecas, Nayarit y Nuevo León; presentando un total de 122 municipios jaliscienses afectados, que equivalen al 97.6% del total estatal, pronosticando escasez hídrica en 58 de estos municipios a consecuencia de la reducción de la precipitación (Conagua, 2023).

A pesar de lo anterior, Jalisco es líder indiscutible en el suministro de alimento a nivel nacional, con un aporte al Producto Interno Bruto (PIB) de 175 mil 989 millones de pesos con una producción de 41 millones 065 mil toneladas, llegando a producir el 25% de los alimentos que consume en su canasta básica, posicionándolo como un productor líder a nivel nacional (Jalisco, 2020); sin embargo, esta producción masiva representa una presión sobre los recursos hídricos de la región, favoreciendo la escasez hídrica, sobre todo en la población más vulnerable, incrementando la inequidad y la pobreza (FAO, 2019). Por lo tanto, como estudio de caso se realizó el análisis de cinco cuencas hidrográficas en los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán, en el estado de Jalisco, dos municipios costeros del occidente de México que presentan un desarrollo económico interrumpido debido a la falta del recurso hídrico; para lo cual, se propone la aplicación del Proceso Analítico Jerárquico (AHP) a fin de evaluar la vulnerabilidad del territorio ante la escasez

hídrica, considerando aspectos ambientales y socioeconómicos de la región, resultados que plantearían el punto de partida para realizar una gestión integral del recurso hídrico y proponer medidas para mitigar los efectos de la sequía en las zonas de mayor vulnerabilidad, permitiendo a los tomadores de decisiones ejercer juicios más certeros basados en estudios técnicos que consideren los diferentes componentes del fenómeno de escasez hídrica.

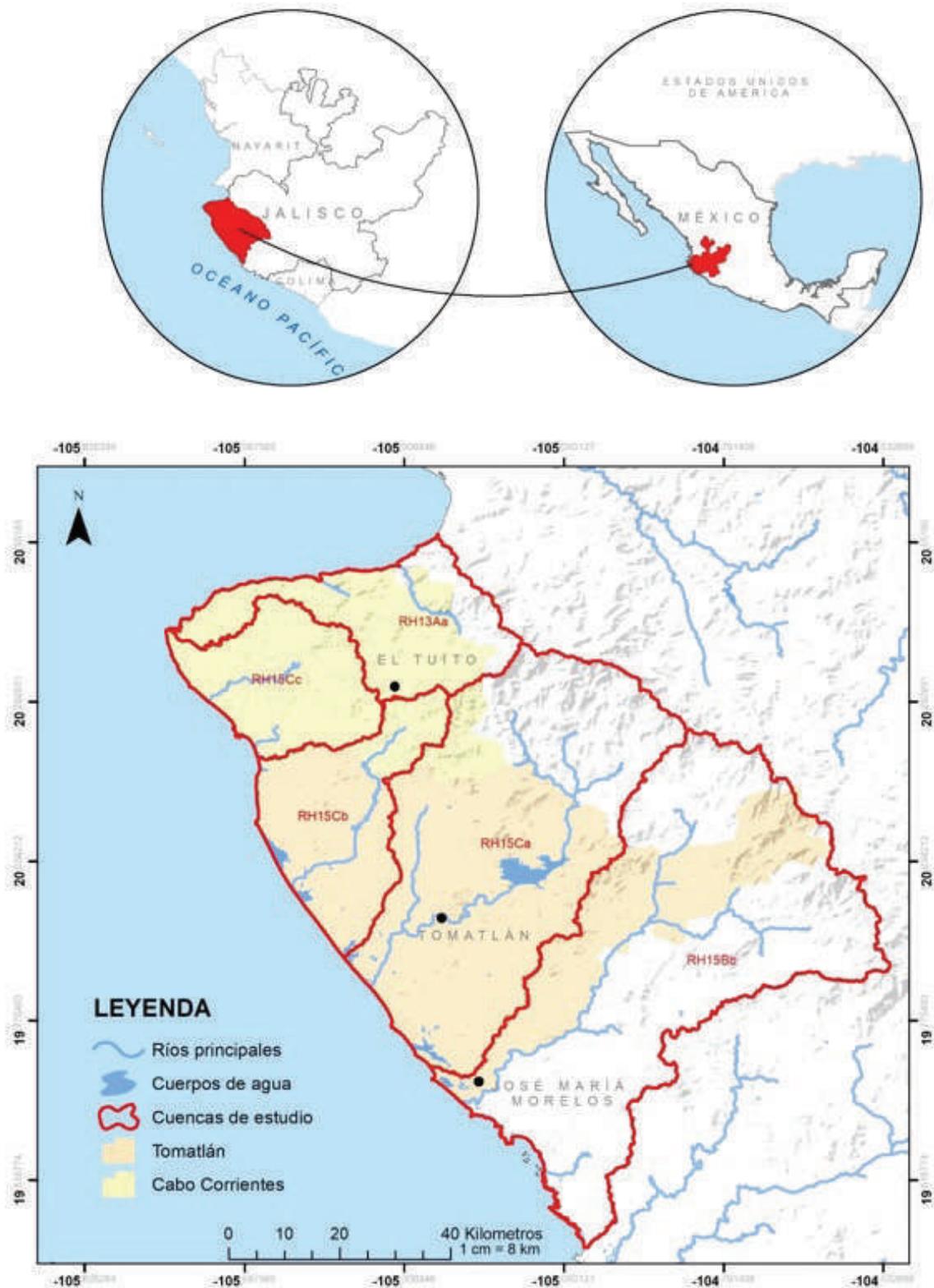
## **Materiales y métodos**

### **Área de estudio**

Se localiza en la costa occidental del pacífico mexicano en el estado de Jalisco (x: 486,806.54475, y: 2,217,630.49817), extendiéndose por más de 731,845 ha a lo largo de cinco cuencas hidrográficas (INEGI, 2010); y a lo largo de las subcuencas hidrográficas de San Nicolás (RH15Bb), Tomatlán (RH15Ca), Mismaloya (RH15Cb) Tecuán (RH15Cc) y Tecomala (RH13Aa) de las regiones hidrológicas RH15 Costa de Jalisco y RH13 Huicicila que se distribuyen a lo largo de los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán, compartiendo límites con los municipios de Ayutla, Cuautla, La Huerta, Puerto Vallarta, Talpa de Allende y Villa Purificación (INEGI, 2021) donde se distribuye una población de 56,474 habitantes en 493 localidades; siendo Tomatlán y El Tuito las urbes más pobladas con 9,842 y 3,835 habitantes respectivamente (INEGI, 2020).

La región presenta un relieve accidentado, influenciado por la convergencia de la Sierra Madre del Sur y el Eje Neovolcánico Transversal; con cotas altitudinales que van desde los 0 hasta los 2,647 msnm (ASTER GDEM, 2020) y precipitaciones que oscilan los 1,624 mm para el municipio de Cabo Corrientes y 1,304 para Tomatlán, con temperaturas medias anuales de 13.3 y 14.5 °C respectivamente, con máximas de 36 y mínimas de 24.6 y 25.3 (IIEG, 2021, 2022), características que han promovido el desarrollo de vegetación templada (260 ha) en las regiones montañosas superiores a los 1,000 msnm y tropical semihúmeda en los valles costeros; por otro lado, en la zona plana cercana a la costa se compone por selva baja subcaducifolia y bosques espinosos (290 ha), así como 160 ha de campos agrícolas.

**Figura 1.** Ubicación del área de estudio. Elaboración propia con datos de INEGI (Red hidrográfica, subcuencas hidrográficas de México 2010, División política nacional, estatal y municipal 2021).



## Métodos

### Proceso analítico jerárquico

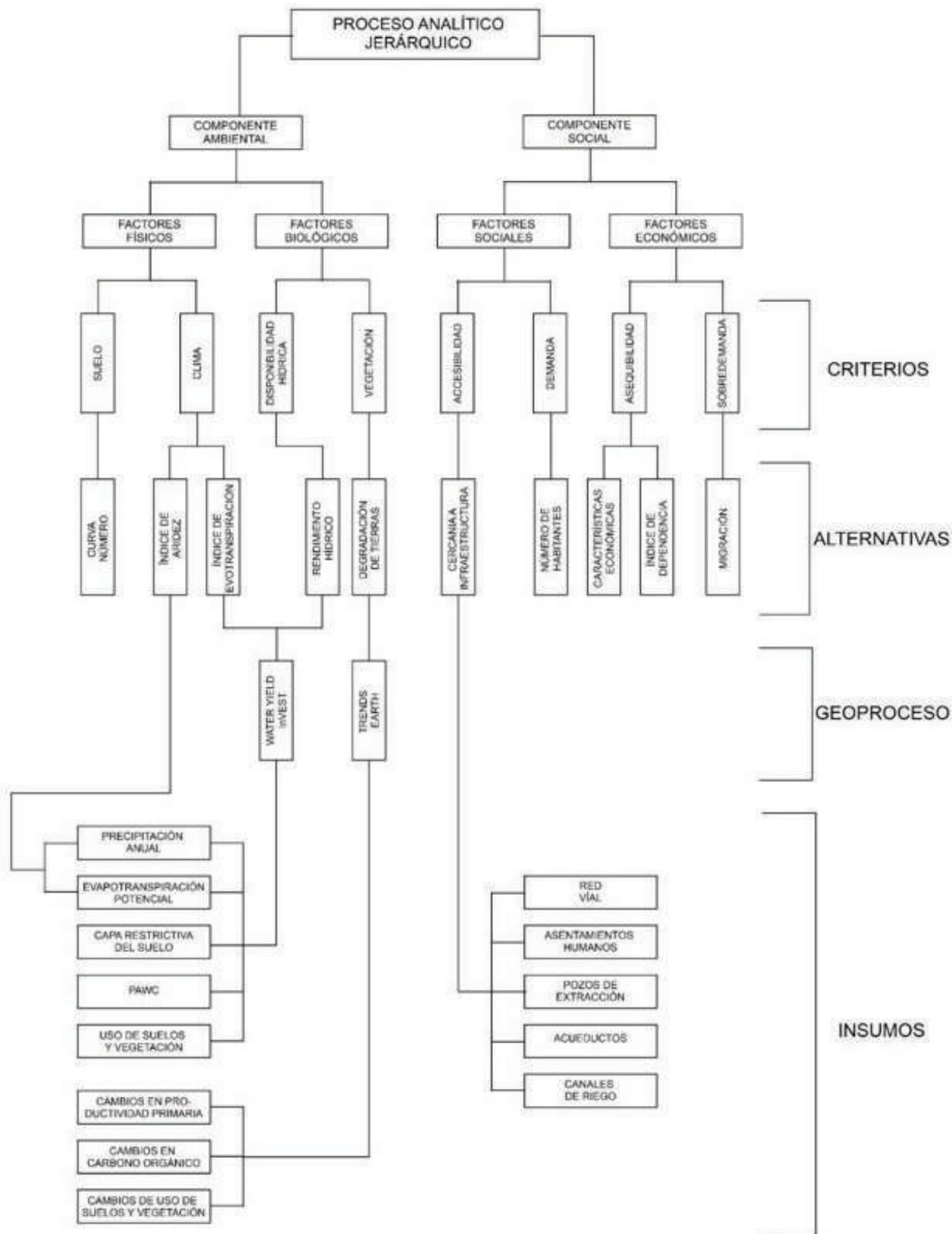
El Proceso Analítico Jerárquico (AHP), permite emitir juicios sustentados en información empírica y técnica científica (Leyva Fontes, C. J., Gatell, A. A. & Alvarez Leyva, 2019), y se utiliza cuando la decisión no depende del simple uso del sentido común o la intuición (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2012) y cuando se tienen aspectos cualitativos difíciles de valorar (Valéncia, 2018) permitiendo integrar hasta siete variables descriptivas para cada escenario, que se definen en función de la problemática de decisión, variando de acuerdo al enfoque y los objetivos del estudio (Saaty, 1977), ha demostrado gran eficiencia en sus resultados al determinar el riesgo en materia de escasez hídrica en países como Cuba (Leyva Fontes, C. J., Gatell, A. A. & Alvarez Leyva, 2019), México (Pérez-Rodríguez *et al.*, 2012), Argentina (Celemín, 2014), China (Chou *et al.*, 2019), Irán (Ekrami *et al.*, 2016), India (Palchaudhuri & Biswas, 2016), Tailandia (Wijitkosum & Sriburi, 2019), Corea del Sur (Mun *et al.*, 2020), Brasil (Cordão *et al.*, 2020), Etiopía (Mesalie *et al.*, 2021), Pakistán (Aslam *et al.*, 2018) entre otros. El método consistió en cuatro etapas principales para su ejecución 1. Formulación de la problemática de decisión, 2. Definición del modelo jerárquico, 3. Estimación de pesos relativos y 4. Análisis de sensibilidad.

En la formulación de la problemática de decisión, se definió la pregunta de investigación y los objetivos, mientras que en la definición del modelo jerárquico se establecieron las variables que influyen sobre el fenómeno estudiado y se determinó la jerarquía de cada una (Wind & Saaty, 1980) (Figura 2), donde se observaron los diferentes factores que definen el componente ambiental y social; así como los criterios y alternativas que definen a cada componente, además de observarse los insumos y procesos requeridos para definir la alternativa.

Con respecto a las variables seleccionadas y para definir la vulnerabilidad ante la escasez hídrica, se integró en el escenario ambiental la sequía física, misma que considera los elementos naturales y físicos propios de la región que promueven la escasez de agua, tales como el clima y el suelo, mientras que el escenario socioeconómico integró variables que definen la escasez social que se refiere al nivel de desarrollo de la infraestructura que controla el acceso, almacenamiento y distribución del recurso hídrico. (UNICEF, 2021).

En la tercera etapa se calificó cada una de las variables considerando su influencia sobre la vulnerabilidad ante la escasez hídrica (problemática de decisión), garantizando que cada una de las alternativas seleccionadas tenga influencia directa sobre el fenómeno y estas fuesen independientes entre sí (Valéncia, 2018).

**Figura 2. Elementos que integran la ejecución del proceso analítico jerárquico.**



Elaborado por: Rivera García J. E. (2021).

El procedimiento de valoración se realizó por pares según la jerarquía 1-9 propuesta por (Saaty, 1977), donde 1 representa que ambos criterios o elementos son igual de importantes sobre la problemática de decisión y 9 considera que cada uno de los elementos comparados es absolutamente más importante; mientras que los números pares representan una diferencia razonable entre los elementos comparados y los impares representan una negociación entre estos (Celemín, 2014; Vargas, 2010).

Para definir los pesos de cada uno de los escenarios se elaboró una matriz de comparación para cada uno de los escenarios, a fin de evitar sesgos en la asignación de cada peso, donde el número de filas y columnas representa el número de criterios o alternativas a evaluar en cada escenario, lo anterior debido a que cada uno de los escenarios contempla el recurso hídrico desde perspectivas diferentes y evaluarlos en la misma matriz significaría conflicto entre los juicios dados; por lo que, el peso relativo obtenido no sería representativo. En total se definieron 10 matrices de comparación, cinco para el escenario ambiental y cinco para el social, mismas que fueron evaluadas a través del índice de consistencia; que mide el nivel de sesgo al momento de calificar y que debe ser menor a 0.1 para garantizar que los pesos relativos fueron asignados correctamente (Saaty, 1977).

La Tabla 1 y Tabla 2, muestran los intervalos, valorización según la escala de Saaty (1997) y el peso individual y total para cada una de las alternativas seleccionadas; así como la fuente de los datos para cada uno de los escenarios. Una vez obtenidas las alternativas que describen a cada uno de los escenarios que se muestran en la Figura 2, se clasificaron los resultados de acuerdo a los intervalos descritos en la Tabla 1 y Tabla 2, para cada uno de los escenarios y se asignó la valorización de acuerdo a la escala de Saaty (1997), rasterizando el producto para posteriormente combinar las variables según su peso relativo total bajo un entorno de sistemas de información geográfico, generando una carta temática por cada escenario, que al final se combinaron en proporciones igualitarias (50/50).

**Tabla 1. Parámetros utilizados para definir los pesos relativos individuales y totales para cada una de las alternativas del componente ambiental.**

	Criterio	Alternativa	Intervalo	Escala	Peso relativo		Fuente
					Individual	Total	
Factores físicos	Suelo	Curva Número	0-20	1	0.02	0.12	(INEGI, 2013b)
			20-40	2	0.04		
			40-60	3	0.06		
	Clima	Índice de aridez	0-1	1	0.03	0.19	Elaboración propia
			1-1.5	2	0.06		
			1.5-2	3	0.1		
		Índice de evapotranspiración	0-20	1	0.01	0.14	Elaboración propia
			20-40	2	0.02		
			40-60	3	0.03		
	60-80		4	0.04			
		80-100	5	0.05			
Factores biológicos	Disponibilidad hídrica	Rendimiento hídrico	> 1,200	1	0.01	0.13	Elaboración propia
			600-1,200	2	0.02		
			300-600	3	0.03		
			100-300	4	0.03		
			0-100	5	0.04		
	Vegetación	Degradación de tierras	Estable	1	0.05	0.42	Elaboración propia
			Mejorado	2	0.11		
		Degradado	5	0.26			

**Tabla 2. Parámetros utilizados para definir los pesos relativos individuales y totales para cada una de las alternativas del componente social.**

	Criterio	Alternativa	Intervalo	Valorización	Peso relativo		Fuente
					Individual	Total	
Factores sociales	Accesibilidad	Cercanía a infraestructura	> 8 km	1	0.01	0.18	Elaboración propia
			4-8 km	2	0.02		
			2-4 km	3	0.04		
			1-2 km	4	0.05		
			< 1 km	5	0.06		
Factores económicos	Demanda	Número de habitantes	0-20	1	0.01	0.17	(REPDA, 2019)
			20-40	2	0.02		
			40-60	3	0.03		
			60-80	4	0.05		
			80-100	5	0.06		
Factores económicos	Asequibilidad	Características económicas	0-20	1	0.02	0.31	(INEGI, 2010)
			20-40	2	0.04		
			40-60	3	0.06		
			60-80	4	0.08		
			80-100	5	0.1		
Factores económicos	Sobredemanda	Índice de dependencia	20-40	2	0.01	0.06	(INEGI, 2010)
			40-60	3	0.01		
			60-80	4	0.02		
			80-100	5	0.02		
			0-20	1	0.02		
20-40	2	0.04					
40-60	3	0.06					
60-80	4	0.07					
80-100	5	0.09					

## Resultados y discusiones

A partir de la integración de los escenarios ambiental y social, se generaron cuatro categorías de vulnerabilidad ante la escasez hídrica (Figura 3), donde la categoría Muy baja representa zonas en las cuales las condiciones ambientales y sociales son favorables en términos de disponibilidad hídrica, mientras que la categoría Alta representa zonas en las que, debido a las condiciones ambientales y el mal manejo del recurso hídrico favorecen la escasez; por lo que, en estas regiones en condiciones de sequía, pueden presentar deficiencias al garantizar el acceso al agua.

En la Figura 3, se observa un territorio dominado por la categoría Baja con 495,429 ha extendiéndose a través del 68% del total; y se distribuye en las partes altas de las cuencas

y en la mayor parte del territorio de Cabo Corrientes, seguido de la categoría Moderada que se extiende en el 30% en 220,078 ha, mientras la categoría Alta se extiende por 10,335 ha, el equivalente a 1.41% del territorio.

Si bien es cierto que la proporción de la categoría Alta con respecto al resto de categorías es baja, la categoría Moderada podría migrar fácilmente hacia categorías Altas al incrementar las condiciones de degradación de los suelos, debido a que el escenario ambiental es el que mayor influencia tiene sobre la problemática de decisión (escasez hídrica); de acuerdo al análisis individual de cada uno de los escenarios presentando 5.2% del total del escenario ambiental con vulnerabilidad Alta, siendo las variables climáticas las de mayor aporte en el escenario.

Considerando el enfoque de cuenca, la subcuenca del río Tomatlán, corresponde a la de mayor susceptibilidad a presentar problemáticas de escasez hídrica, debido a que esta contiene el 89% del total del territorio registrado con categoría de vulnerabilidad Alta, además de que en la cuenca media y baja se desarrolla una intensa actividad agrícola, misma que es sustentada por la presa Cajón de Peña, infraestructura hidráulica que en los últimos años ha presentado un incremento en la demanda hídrica, consecuencia de la diversificación de la agricultura, ganadería y el aprovechamiento acuícola; representando una amenaza para la población y los diferentes sectores económicos (JICOSUR, 2020).

De acuerdo con el monitor de sequías de la Comisión Nacional del Agua, el área de estudio ha presentado sequías severas (D2) en los años 2007-2009, 2011 y 2019, ocasionando pérdidas de cultivos y pastos, incendios y escasez de agua, obligando a los organismos reguladores del agua a establecer restricciones de uso del recurso como medida preventiva.

En 2019, la Secretaría de Desarrollo Agropecuario, Rural y Pesca (SEDARPA) realizó el pago del Seguro Agrícola Catastrófico por la pérdida de 83 ha de cultivos en el municipio de Tomatlán a consecuencia de la sequía; y de acuerdo con el Instituto de Información Estadística y Geográfica del Estado de Jalisco (2021), el 90.6% de la superficie dedicada a la agricultura en el municipio de Tomatlán presentó sequía, siendo la sequía Severa y Extrema las categorías más representativas (30.1 y 30.1% respectivamente).

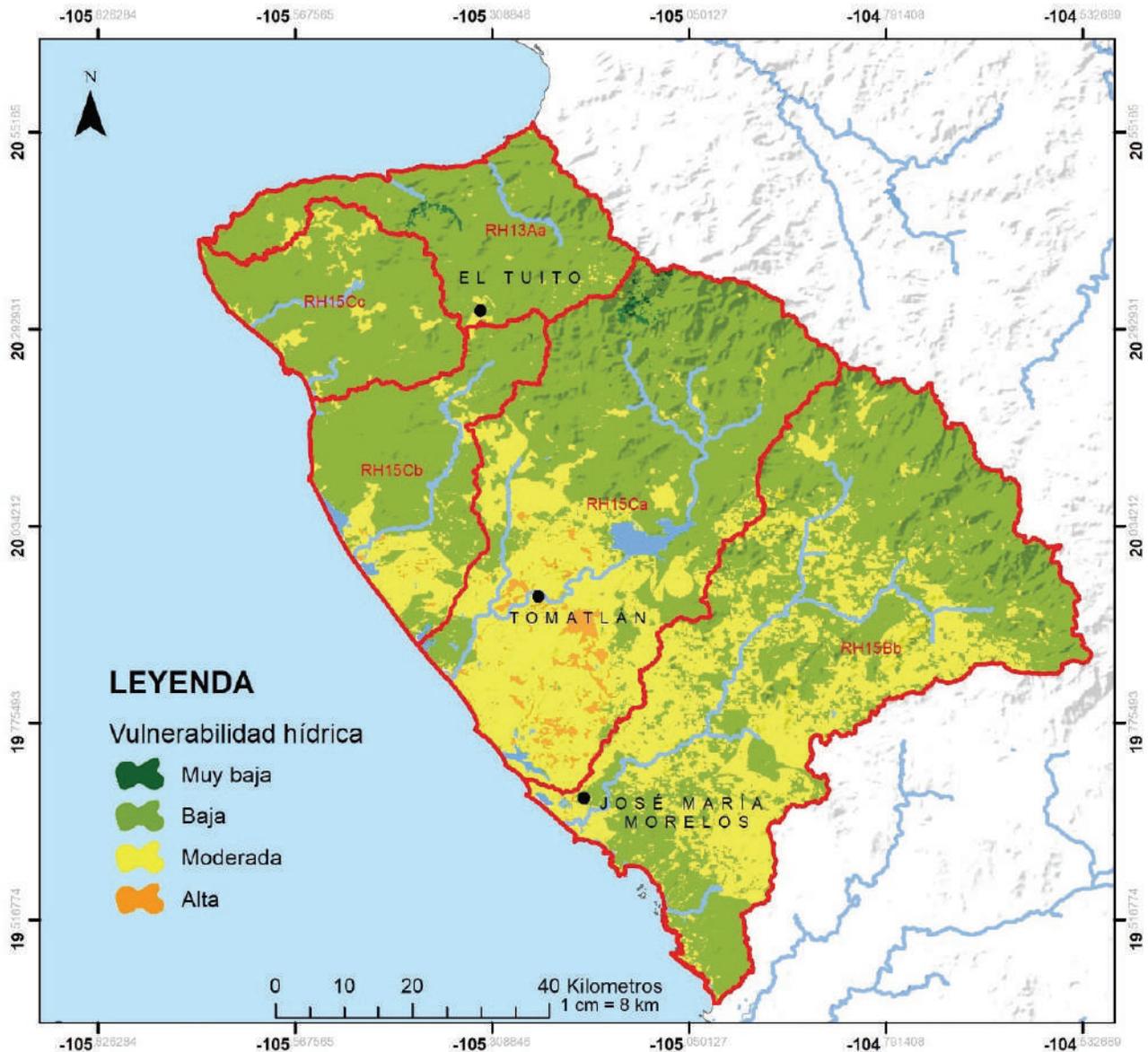
De acuerdo Con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (2023), se espera que los peligros, sobre todo los hidrometeorológicos se intensifiquen y existan repercusiones sobre la sociedad y las economías de todo el mundo.

Bajo un escenario de cambio climático, el municipio de Tomatlán podría presentar efectos adversos sobre los sectores agrícola y ganadero; el cual, en 2021 representó el 1.74% de la producción agrícola estatal, con un aporte de 1,350,076 miles de pesos en el sector

agrícola y 344,479 miles de pesos para el sector ganadero, representando una pérdida económica importante para el estado y el municipio en un escenario catastrófico de baja producción por escasez hídrica.

Por otro lado, el municipio de Cabo corrientes, presentó un mejor estado de conservación en su vegetación nativa y una producción agrícola de menor proporción e intensidad con respecto a su vecino municipal; sin embargo, en los últimos años, la demanda hídrica por parte de la industria hotelera ha crecido y puede incrementar la vulnerabilidad ante la escasez hídrica, dando como resultado pasar a clasificaciones Altas de vulnerabilidad.

**Figura 3. Vulnerabilidad ante la escasez hídrica para la región estudiada.**



## Conclusiones

La escasez hídrica es un fenómeno que incrementa su intensidad y frecuencia a medida que crece la población y el cambio climático se intensifica, es necesario conocer su distribución en el territorio para plantear las causas de su origen y proponer medidas para minimizar los efectos adversos.

Los resultados muestran una distribución de vulnerabilidad Alta focalizada en la subcuenca del río Tomatlán y Mismaloya; donde se desarrolla una importante actividad agrícola, acuícola y ganadera, actividades que podrían verse afectadas en condición de escasez hídrica, afectando el desarrollo económico de la región y la calidad de vida de los pobladores.

Es necesario establecer planes y programas que consideren el recurso hídrico como factor prioritario, integrando aspectos sociales, económicos, ambientales y la demanda hídrica que estos sectores representan, a fin de conocer la disponibilidad hídrica actual y el futuro de las actividades económicas que se relacionan con dicho recurso.

Conocer la zonificación espacial de la vulnerabilidad hídrica ante la escasez en el occidente de México, es sólo el primer paso para gestionar los territorios de los municipios más productivos como Tomatlán; por lo tanto, es necesario que se instauren políticas públicas en coordinación con la sociedad civil para establecer medidas que reduzcan y optimicen el uso del agua; además de implementar planes y monitoreos que indiquen la forma de actuar en caso de que el siniestro se presente y cuáles deberían ser las acciones que cada usuario del agua debería tomar para garantizar una accesibilidad equitativa para cada uso.

## Referencias

- Aslam, A. Q., Ahmad, I., Ahmad, S. R., Hussain, Y., Hussain, M. S., Shamshad, J., & Zaidi, S. J. A. (2018). Integrated climate change risk assessment and evaluation of adaptation perspective in southern Punjab, Pakistan. *Science of the Total Environment*, 628-629, 1422-1436. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.129>
- Celemín, J. P. (2014). Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG). *Geografía y Sistemas de Información Geográfica*, 6, 47-63.
- Chou, J., Xian, T., Zhao, R., Xu, Y., Yang, F., & Sun, M. (2019). Drought risk assessment and estimation in vulnerable eco-regions of China: Under the background of climate change. *Sustainability (Switzerland)*, 11(16). <https://doi.org/10.3390/su11164463>
- Conagua. (2023). *Monitor de sequía en México 15 de marzo del 2023*.
- Cordão, M. J. de S., Rufino, I. A. A., Barros Ramalho Alves, P., & Barros Filho, M. N. M. (2020).

- Water shortage risk mapping: a GIS-MCDA approach for a medium-sized city in the Brazilian semi-arid region. *Urban Water Journal*, 17(7), 642-655. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2020.1804596>
- Ekrami, M., Marji, A. F., Barkhordari, J., & Dashtakian, K. (2016). Drought vulnerability mapping using AHP method in arid and semiarid areas: a case study for Taft Township, Yazd Province, Iran. *Environmental Earth Sciences*, 75(12). <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5822-z>
- FAO. (2013). *Afrontar la escasez de agua: un marco de acción para la agricultura y la seguridad alimentaria*. Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- FAO. (2019, March 22). *Escasez de agua: Uno de los mayores retos de nuestro tiempo*. Food and Agriculture Organization for the United Nations. <https://www.fao.org/fao-stories/article/es/c/1185408/>
- IIEG. (2021). *Tomatlán Diagnóstico municipal agosto 2021*.
- IIEG. (2022). *Cabo Corrientes Diagnóstico del municipio agosto 2022*.
- IMCO. (2023a). Aguas en México ¿Escasez o mala gestión? *Instituto Mexicano Para La Competitividad A.C.*
- IMCO.(2023b). *SITUACIÓN DEL AGUA EN MÉXICO*. Instituto Mexicano Para La Competitividad, A.C. <https://imco.org.mx/situacion-del-agua-en-mexico/#:~:text=En%202021%20se%20registraron%208%2C491,en%20embalses%2C%20arroyos%20y%20pozos.>
- INEGI. (2020). *Censo de Población y Vivienda*.
- INEGI. (2021). División política municipal, 1:250000. 2020. In *Archivo vectorial. Marco geoestadístico 2020*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- IPCC. (2023). La acción climática urgente puede garantizar un futuro habitable para todos. *Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- Jalisco. (2020, October 12). *EL CAMPO DE JALISCO, LÍDER INDISCUTIBLE EN LA APORTACIÓN DE ALIMENTOS*. Gobierno Del Estado de Jalisco. <https://www.jalisco.gob.mx/es/prensa/noticias/117580>
- JICOSUR. (2020). *Estudio técnico justificativo para la creación del área estatal de protección hidrológica*.
- Leyva Fontes, C. J., Gatell, A. A. & Alvarez Leyva, I. (2019). Proceso Analítico Jerárquico. Herramienta para la gestión del ordenamiento urbano-ambiental en el eje Luaces de Camagüey. *Arquitectura y Urbanismo*, XL(2), 43-57.
- Mesalie, R. A., Aklog, D., & Kifelew, M. S. (2021). Failure assessment for drinking water distribution system in the case of Bahir Dar institute of technology, Ethiopia. *Applied Water Science*, 11(8). <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01465-7>
- Mun, Y. S., Nam, W. H., Jeon, M. G., Bang, N. K., & Kim, T. (2020). Assessment of vulnerability to drought disaster in agricultural reservoirs in South Korea. *Atmosphere*, 11(11). <https://doi.org/10.3390/atmos11111244>
- Palchaudhuri, M., & Biswas, S. (2016). Application of AHP with GIS in drought risk assessment for Puruliya district, India. *Natural Hazards*, 84(3), 1905-1920. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2526-3>

- Pérez-Rodríguez, F., Vargas-Larreta, B., Aguirre-Calderón, O. A., Corral-Rivas, J. J., & Rojo-Alboreca, A. (2012). Proceso Analítico Jerárquico Para Seleccionar Métodos De Manejo Forestal En Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 4(15), 055-072. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v4i15.448>
- Saaty, T. L. (1977). A Scaling Method for Priorities in Hierarchical Structures. *Journal of Mathematical Psychology*, 15(3), 234-281.
- UNESCO. (2015). *Abordar la escasez y la calidad del agua*. Organización de Las Naciones Unidas Para La Educación, La Ciencia y La Cultura. <https://es.unesco.org/themes/garantizar-suministro-agua/hidrologia/escasez-calidad>
- UNICEF. (2021). *WATER SECURITY FOR ALL*.
- València, U. P. de. (2018). *Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) - El blog de Víctor Yepes*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/27/proceso-analitico-jerarquico-ahp/>
- Vargas, R. (2010). *Using the analytical hierarchy process (AHP) to select and prioritize projects in a portfolio*. <http://rvarg.as/1s>
- Wijitkosum, S., & Sriburi, T. (2019). Fuzzy AHP integrated with GIS analyses for drought risk assessment: A case study from Upper Phetchaburi River Basin, Thailand. *Water (Switzerland)*, 11(5). <https://doi.org/10.3390/w11050939>
- Wind, Y., & Saaty, T. L. (1980). Marketing Applications of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 26(7).



# 7

## **Análisis del riesgo por inundación en la zona urbana del municipio de Tlaltenango, Zacatecas**

*Jiménez Martínez, Paola Patricia*

Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México,  
jmzzac2405@gmail.com, ORCID:0009-0003-0756-2735

*Dzul García, Oscar Antonio*

Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México, oscar.  
dzul@uaz.edu.mx, ORCID: 0000-0001-6711-4043

*Pineda-Martínez, Luis Felipe*

Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México,  
lpineda@uaz.edu.mx, ORCID: 0000-0002-0803-5625

*Rodríguez-González, Baudelio*

Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México,  
baudebgr@uaz.edu.mx, ORCID: 0000-0003-4737-2621

*Aguilar Ortega, Francisco*

Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México,  
francisco.aguilar@uaz.edu.mx, ORCID: 0000-0001-7893-4100

Citar este capítulo: Jiménez Martínez, P. P, Dzul García, O. A., Pineda-Martínez, L. F., Rodríguez-González, B., Aguilar Ortega, F. (2024). Análisis del riesgo por inundación en la zona urbana del municipio de Tlaltenango, Zacatecas. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales - Hernández, J.C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim, México. Pp: 121 - 137.

### **Resumen:**

A nivel mundial, después de la sequía, la inundación es el segundo peligro hidrometeorológico de mayor afectación en las zonas urbanas, generando daños a las viviendas, infraestructura civil, pérdidas económicas y humanas, así como a los servicios a la población, salud pública. En esta investigación se realizó el análisis de riesgo por inundación en Tlaltenango de Sánchez Román, Zacatecas para la tormenta ocurrida el 20 de julio de 2008. Basado en la caracterización de la tormenta asociada, empleando parámetros geométricos y geomorfológicos de la cuenca, en el modelo hidrológico HEC-1 se determinó el hidrograma de escurrimiento. Se desarrolló el modelo hidráulico HEC-RAS del arroyo y zona urbana afectada integrando información topográfica a detalle,

configuración de los puentes y alcantarillas, rugosidades, los usos y tipos de suelo. Los resultados numéricos de tirantes y extensión de inundación fueron mapeados para determinar la vulnerabilidad y grado de exposición a viviendas y comercios. Con los registros de encuestas y trabajo de campo se caracterizó el nivel socioeconómico de las viviendas (clasificación del CENAPRED) y comercios en la zona inundada. La información fue procesada y los resultados del modelo hidráulico se integraron a un Sistema de Información Geográfica. Del análisis de viviendas y comercios afectados en la inundación, se realizó el cálculo del riesgo por la inundación. Los mapas generados y el análisis de la vulnerabilidad han contribuido a una mejor gestión del riesgo por inundación, generando un plan de contingencia municipal. En ese sentido la modelación hidráulica presenta una buena herramienta para la gestión del riesgo.

Palabras clave: [Modelo hidrológico HEC-1](#); [modelación hidráulica](#); [SIG](#).

Línea temática: 2. Diagnóstico y análisis de procesos

## Introducción

A nivel mundial, las inundaciones es el segundo peligro hidrometeorológico que genera mayores impactos económicos y sociales (EM-DAT, The international Disaster Database, 2020), generando daños a las viviendas, infraestructura civil, pérdidas económicas y humanas, así como a los servicios a la población, salud pública (UNESCO, 2020).

El ciclo hidrológico detalla el desplazamiento del agua en la Tierra, incluyendo la evaporación y transpiración, la condensación que da origen a las nubes, seguida de la precipitación y finalmente, el regreso del agua a los océanos, lagos, ríos y acuíferos (UNESCO, ONU-Agua, 2020).

Cuando la precipitación es intensa y con una duración suficiente para almacenarse en el terreno respecto a la capacidad de infiltración, el volumen en exceso escurre gravitacionalmente hacia la red de drenaje de las cuencas. El flujo acumulado es drenado hacia el cauce principal, produciendo un incremento del gasto y el tirante hidráulico. La inundación ocurre cuando excede la capacidad hidráulica desbordando en las márgenes y zonas bajas aledañas, condición apropiada para asentamientos urbanos o agrícolas (Tucci, 2007).

Por su localización geográfica, México está expuesto recurrentemente a huracanes y lluvias intensas en los meses de mayo a octubre y en áreas propensas a eventos climáticos extremos, generando inundaciones y afectaciones a la infraestructura civil y productiva. Según el Atlas Nacional de riesgos, en el período 2000-2019, se registraron 3500 eventos de inundaciones urbanas, con afectación promedio anual de 2 millones de habitantes.

Entre los principales efectos de las inundaciones, evacuación de comunidades, daños a la infraestructura, viviendas, vías de comunicación, infraestructura urbana y de servicios básicos. Las pérdidas promedio anual en el período 2000-2020 de 5,000 millones de pesos. (CENAPRED, 2021). Por ejemplo, el año 2020 estuvo marcado por 438 eventos de desastres, con un monto de daños y pérdidas de 32,776 millones de pesos, equivalente a 0.14% del Producto Interno Bruto (PIB) de ese año. De los desastres por peligros hidrometeorológicos, el 43% fueron asociados a lluvias extremas para el mismo año 2020, siendo cuatro eventos principales de inundaciones en Chiapas y Tabasco con una cifra de 16,918.4 millones de pesos. (CENAPRED, 2021).

La evaluación del riesgo de inundación ha adquirido mayor frecuencia en su aplicación, principalmente debido a la planificación urbana y a los esfuerzos de mitigación de desastres. Cuantificar dicho riesgo resulta una labor complicada dada la diversidad de variables involucradas y su constante evolución. (Hernández-Uribe et al, 2017). La aplicación de herramientas de modelado hidrológico e hidráulico y su integración a Sistemas de Información Geográfica (SIG), permiten integrar productos digitales para mejor análisis, interpretación del riesgo por inundación, permitiendo plantear acciones planificación, gestión, prevención o mitigación.

El estado de Zacatecas se localiza en la parte centro-norte del país, no estando exento a los efectos de los ciclones tropicales (Vega-Camarena et al., 2018). Dichos fenómenos al transportar grandes cantidades de humedad pueden provocar tormentas de larga duración, del orden de varios días y abarcar grandes extensiones. Los flujos humedad transportados a través de niveles medios en la atmosfera, generan una serie de eventos de lluvia extrema en la regios occidental del altiplano mexicano (Vega-camarena et al., 2023). De esta manera para la región suroeste del esta de Zacateas se registran más de una inundación por año, alcanzando niveles de 40 a 60 cm, éstas suelen afectar porciones de los municipios que son más próximas a arroyos o ríos, dentro de estos se encuentran Villa García, Pinos, Villanueva, Jerez, Gral. Pánfilo Natera, Sombrerete, Cañitas de Felipe Pescador, Juan Aldama, Villa de Cos, Calera, Guadalupe, Fresnillo y Zacatecas. Al sur del estado de Zacatecas se localiza la cabecera municipal de Tlaltenango de Sánchez Román que ha sufrido inundaciones históricas del arroyo El Xaloco que cruza la zona urbana. (Crónicas registradas en años 1944, 1967, 1970, 2008). Estas inundaciones han generado afectaciones económicas y daños a la infraestructura urbana (Pineda-Martínez et al, 2014). El objetivo del presente estudio fue analizar la condición hidrológica e hidráulica y el impacto económico de la inundación del 18 de julio de 2008 del arroyo El Xaloco en la ciudad de Tlaltenango de Sánchez Román, Zacatecas.

## Descripción de la zona de estudio

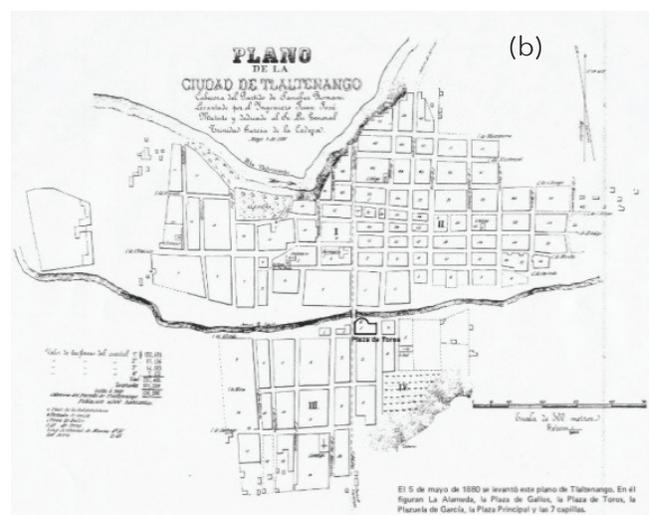
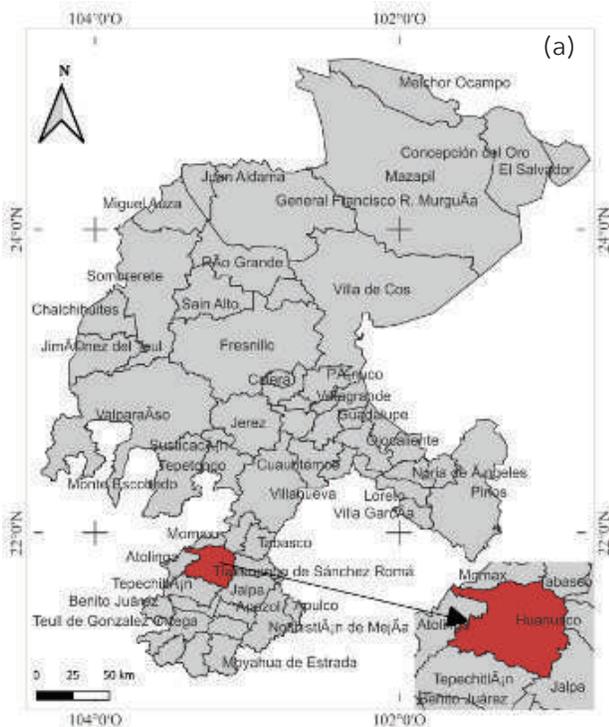
El municipio de Tlaltenango de Sánchez Román se localiza en la parte sur del estado de Zacatecas, en las coordenadas 103.3071° longitud Oeste y 21.7809° latitud Norte, con

una altitud promedio de 1695 msnm. Debido a la ubicación del municipio su clima es considerado como semicálido, en el que las lluvias son más abundantes en el período junio a octubre, con precipitación anual de 553 a 700 mm. La intensidad de la precipitación y el relieve han condicionado la concentración de escurrimientos recurrentes en la zona urbana de Tlaltenango situada en un valle creando una vulnerabilidad latente en las márgenes del arroyo El Xaloco (Dzul y Hotchkiss, 2010).

### Antecedentes históricos de inundaciones en Tlaltenango

Históricamente Tlaltenango ha sido afectado por inundaciones recurrentes, registros señalan la problemática desde el siglo XVI, el desarrollo habitacional está entre el Río Tlaltenango y el Arroyo El Xaloco. El registro documentado más antiguo es 1898. Un testimonio hace mención sobre la vida cotidiana del pueblo y a su vez del comportamiento de las corrientes de agua: “En tiempo de agua se siembra, se cultiva, crecen los arroyos y el río va tan grande que cubre con sus aguas toda la “alameda” y las playas arenosas que están hacia el poniente.” (Casas, 1986). Hace suponer en temporada de tormentas la afectación de la periferia de la zona urbana, el mismo autor describe otras crecidas “Pasan los días y El Xaloco inunda la población y es arrasada la Plaza de Toros”.

**Figura 1. a) Mapa de localización del municipio de Tlaltenango de Sanchez Roma, Zacatecas. a) Ciudad de Tlaltenango 1880, conformación del espacio en relación a las corrientes de agua, al norte el Río Tlaltenango, al sur Arroyo El Xaloco.**



Otro registro de inundación en 1944 cubrió el barrio de Veracruz, meses antes se había construido el puente para cruzar el Río Tlaltenango, elemento que muestra la necesidad de contar con pasos seguros, sobre los ríos y los arroyos. El 23 de septiembre de 1967 ocurrió una “crecida” en El Xaloco que dejó llanto, dolor y desolación. Las enfurecidas aguas entraron hasta las casas del barrio de Veracruz y alcanzaron 1.30 metros de altura. En la madrugada, una terrible tromba azotó la Sierra de Morones y para las primeras horas de la mañana el cauce del arroyo fue insuficiente para contener las aguas broncas que arrastraban rocas, animales muertos y troncos. En un instante los lodos revueltos con agua cubrieron las arcadas de cal y canto del puente del Xaloco, el cual une los barrios de San José y Veracruz con el resto de la población (Casas, 1986). La magnitud del desastre fue tal que tres años después aun recordaban la crecida del arroyo, para 1970 quedó registrada la siguiente cita: “...hubimos de cruzar El Xaloco, arroyo que separa del núcleo los barrios Veracruz y San José, mismos que fueron cubiertos, tres años hace, con las aguas desbordadas del Xaloco.” (Montañez, 1970). Ninguna de las crecidas anteriores había sido tan destructiva como la de 1967 por la cantidad de gente que se vio afectada, donde el agua, alcanzó la altura de 1.30 metros, provocando grandes daños: “Las pérdidas materiales fueron muchas, alcanzaron sin duda millones, pues sólo las viviendas desaparecidas totalmente fueron 79, algunas de ellas de considerable valor. Este duro revés impresionó tristemente por espacio de mucho tiempo”.

En la obra titulada: Tlaltenango de Zacatecas (Geografía, Historia, Tradición y Anécdotas) publicada en 1972 por José G. Montes, menciona también los dos crecimientos del arroyo el Jaloco, del año 1944 y del 23 de septiembre de 1967, haciendo hincapié que el segundo fue más destructivo, dejando grandes pérdidas (Montañez, 1970). El autor realiza una propuesta en la que solicita a las autoridades atención para solucionar al problema del arroyo El Xaloco: Deben las autoridades del Estado, con el apoyo económico y técnico de la Federación, avocarse a la solución del problema de El Xaloco, en auxilio del Municipio que carece de los recursos indispensables para el efecto. También la iniciativa privada debe significarse en esta realización, para evitar en lo futuro un peligro que con razón constituye la horrible pesadilla de centenares de familias.

Desde 1970 que se publicó la obra de Montañez ya se hacía latente este llamado a las autoridades para que atendieran el problema del arroyo El Xaloco, resaltando la posibilidad de nuevas inundaciones.

En la madrugada del 18 de julio de 2008 las lluvias generaron un torrente inundando Tlaltenango, dejando pérdidas humanas, materiales y económicas. Para la inundación en estudio y análisis de riesgo, se describen las características principales del fenómeno. El 16 y 17 de julio de 2008 se presentaron lluvias de origen convectivo y locales en la cuenca del arroyo El Xaloco (Pineda-Martínez *et al.*, 2014). El fenómeno meteorológico que originó estas lluvias fue una baja presión que interactuó con la entrada de humedad debido de los desprendimientos nubosos del huracán Fausto, en el Océano Pacífico. El 18

de julio se presentó una lluvia convectiva local en la parte alta de la cuenca, registrando una lluvia acumulada de 157 mm en 24 horas en la estación meteorológica Los Fresnos. La precipitación presentada corresponde con el promedio histórico del mes de julio, siendo la precipitación del 18 de julio de características extraordinarias. La inundación provocó tres decesos, 15 mil habitantes damnificados y al menos 22 desaparecidos. La noche del 18 de julio arreció la lluvia y en la madrugada se desbordó el arroyo a la zona urbana, afectando a cinco barrios, dañando 1606 viviendas, más de 500 vehículos y pérdida total en más de 224 comercios. El nivel de inundación máximo fue de 2.15 metros, viviendas y calles quedaron azolvadas con un metro de lodo (Figura 2a) (Dzul y Hotchkiss, 2010). Un hecho insólito fue la inundación de la plaza de toros, siendo arrastrando un vehículo compacto, quedando en barrera de esta plaza (Figura 2b).

**Figura 2. a) Nivel de inundación en la margen del arroyo El Xaloco; b) Automóvil en barrera de la plaza de toros.**



## Materiales y métodos

A través de la siguiente metodología se realizó el análisis del riesgo por inundación (Jiménez, 2018).

1. Integración, depuración y procesamiento de información y su integración a un Sistema de Información Geográfica (SIG).
2. Desarrollo del modelo hidrológico.
3. Acoplar el modelo hidrológico al modelo hidráulico del Arroyo El Xaloco.
4. Determinación de la extensión y profundidades de inundación.
5. Determinación de la vulnerabilidad socioeconómica de la zona afectada.
6. Análisis de riesgo.

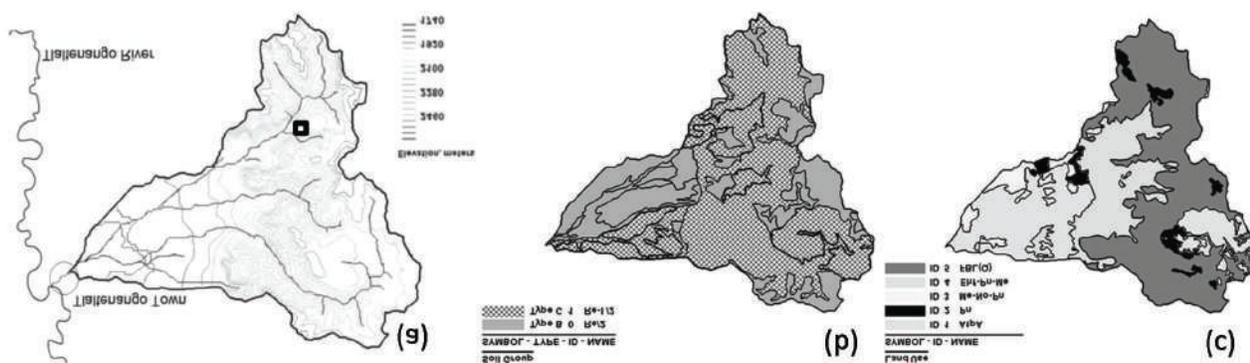
Por medio de SIG se usaron las cartas de topografía F13D16 y F13D26 del INEGI (2010), para generar el mapa de elevación mexicano (CEM) interpolando a un mallado de 25 metros de tamaño de celda. Las capas vectoriales de uso, el tipo de suelo a escala

1:50000 fueron integradas vectorialmente al SIG. La información cartográfica impresa y digital referente a las temáticas edafológica, de uso de suelo y vegetación, topográfica y cartas temáticas disponibles a mayor resolución fueron vectorizadas y también integradas al proyecto de SIG.

Empleando el CEM, a partir del punto hidrológico de salida de cuenca, con las extensiones Arc-Hydro con el algoritmo de 8 puntos en las celdas para la determinación de la acumulación y dirección de flujo, se delimitó la cuenca. Con este procedimiento se parametrizó su geografía, resultando en una elevación media de cuenca de 2029.5 msnm con un área de 110.2 Km<sup>2</sup>, y una pendiente del 21.8%, perímetro de 72.8 Km; para el cauce principal de 22.41 Km de longitud y 3.48% de pendiente. El cauce principal inicia en la región montañosa de la cuenca en dirección hacia la localidad de Tlaltenango, una parte de transición antes de llegar a la ciudad donde la pendiente disminuye considerablemente contribuyendo a la reducción de la velocidad del flujo en la zona urbana produciendo el depósito de los sedimentos transportados durante la avenida.

Para el análisis hidrológico, se desarrolló el modelo HEC-1 (USACE HEC-1, 2000) para la transformación del proceso lluvia-escorrentía con el método de pérdidas y Número de Curva (N) del Servicio de Conservación de Recursos Naturales del Departamento de Agricultura (NRCS, 2008). Para la determinación del parámetro N se analizó la combinación específica del suelo, cobertura y usos del suelo obtenidos de cartas temáticas del INEGI (Figura 3a, 3b y 3c), se definieron los grupos hidrológicos, suelo-vegetación, así como las condiciones antecedentes de humedad. Para la asignación de los números de curva N se aplicó el codificado de Anderson Level II. Los principales usos de suelo son AtpA correspondiente a suelo de agricultura temporal; Me-No-Pn, mezquital, nopalera y pastizal natural; Ehf-Pn-Me, erosión hídrica fuerte, pastizal natural y mezquital. El número de curva ponderado para la cuenca general N=72. Los grupos hidrológicos predominantes son 90% tipo C y 10% del grupo D, suelos de baja tasa de infiltración y alto potencial de escurrimiento. Para el modelo de abstracción se consideró la condición de humedad antecedente tipo III, condición máxima de humedad por efecto de la saturación del suelo.

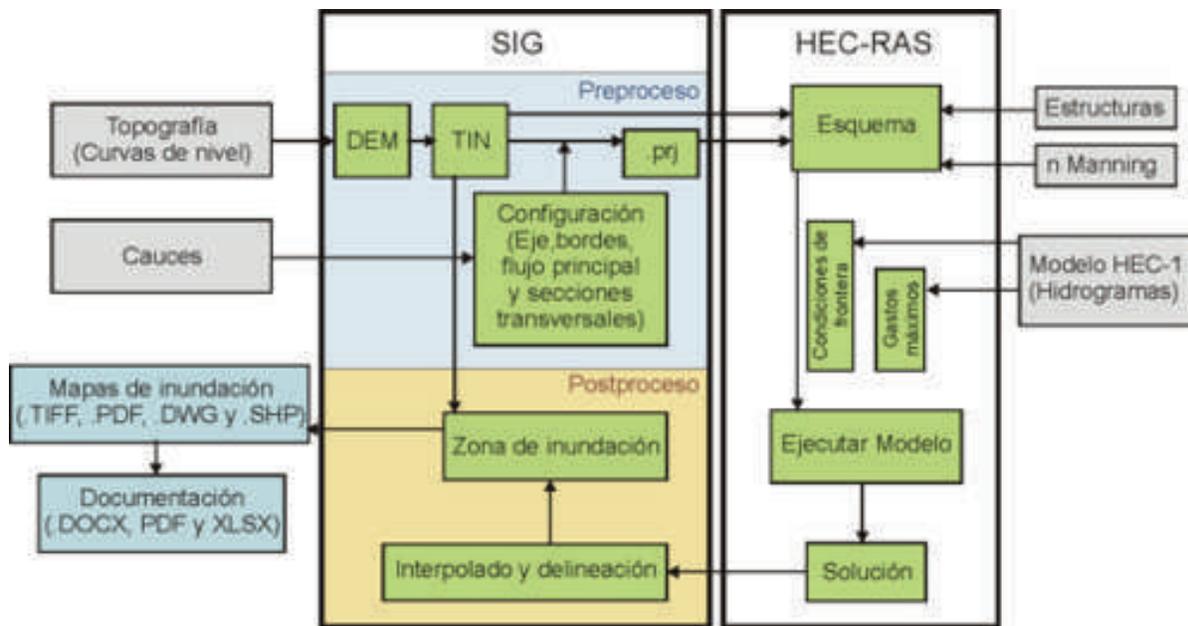
**Figura 3. a) Polígono y curvas de nivel de la cuenca de estudio, el punto indica la posición de la estación Los Fresnos, b) Tipo de suelo, y c) Mapa de uso de suelo.**



El tiempo de tránsito de la concentración fue 55 minutos, corresponde al tiempo de flujo desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida. Con la información de los registros de lluvia de la estación Los Fresnos 32184 controlada por la Conagua, se determinó la lluvia máxima 157 mm, duración 2 horas y su variación temporal. Para la distribución de la tormenta se aplicó una curva de distribución tipo II.

En la Figura 4 se muestra el proceso metodológico empleado para el desarrollo del modelo hidráulico y determinación de la extensión de la inundación. Se usó la herramienta HEC-RAS (USACE, 2010) para realizar el análisis del no permanente unidimensional gradualmente variado en lámina libre. El perfil de la superficie del agua se calculó desde una sección transversal aguas arriba resolviendo la ecuación de la energía con el procedimiento iterativo denominado método estándar paso a paso. Para las pérdidas totales de energía entre secciones transversales, se calcularon las pérdidas por fricción, por contracción o expansión. Los bloques de color gris corresponden a la información empleada, los correspondientes al color azul claro a los productos obtenidos y en verde representan las actividades desarrolladas.

**Figura 4. Esquema de trabajos de campo y gabinete para la integración del SIG, desarrollo del modelo HEC-RAS para determinación de la zona de inundación.**

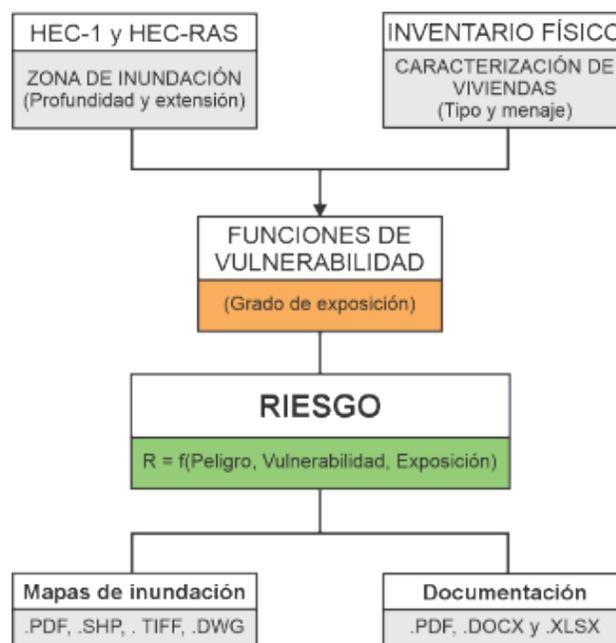


Se hizo el levantamiento topográfico de 1.93 km del arroyo y zona urbana afectada por la inundación, y se realizó el trazo con el levantamiento del perfil del cauce en 41 secciones transversales y de 6 estructuras hidráulicas (puentes y caminos de acceso). Se construyó una capa vectorial para definir la rugosidad de Manning, se tomó un valor  $n = 0.027$  para el cauce, textura y granulometría media. Para los márgenes,  $n = 0.035$  por la presencia de

obstrucciones y vegetación del tipo matorral. Para la zona urbana  $n = 0.08$ , representando la influencia de las viviendas en el análisis del flujo hidráulico. Para los puentes se agregó información de las expansiones y contracciones, altura, ancho, tipo y forma de columnas y tipo de material. De esta manera se definieron las áreas inefectivas (áreas de la sección transversal que no contribuyen efectivamente al transporte del gasto) aguas arriba y abajo de los puentes, longitud de contracción para calcular los coeficientes de pérdida local por estas obras. Para las condiciones de frontera, se analizaron las características del cauce en los puntos extremos, se consideró la condición de flujo uniforme con pendiente topográfica 0.017 aguas arriba y 0.02 aguas abajo.

El análisis del peligro al que se estuvo expuesto, así como estudiar y conocer a detalle el fenómeno perturbador, para este caso la inundación del 18 de julio del 2008 permitió identificar el grado de afectación de las viviendas inundadas y su caracterización socioeconómica permite cuantificar el riesgo. La base fundamental para un diagnóstico adecuado de riesgo es el conocimiento científico de los fenómenos (peligros o amenazas) que afectan a una región determinada, además de una estimación de las posibles consecuencias del fenómeno; éstas dependen de las características físicas de la infraestructura existente en la zona, así como de las características socioeconómicas de los asentamientos humanos. Según en CENAPRED, y retomando lo anterior el riesgo es entendido como el producto del peligro (agente perturbador), la vulnerabilidad (propensión a ser afectado) y la exposición (valor del sistema afectable). En la Figura 5 se muestra el proceso de análisis del riesgo para el caso de estudio.

**Figura 5. Esquema para el análisis del Riesgo.**



Para evaluar la función de vulnerabilidad, el CENAPRED desarrolló expresiones matemáticas, que relacionan las consecuencias del tirante de inundación y los daños a los bienes que tiene la población dentro de sus viviendas, conocida como menaje o enseres, se tienen cinco tipos de vulnerabilidad acorde al nivel socioeconómico (Tabla 1) y gráficas que relacionan al tirante de inundación (Figura 6).

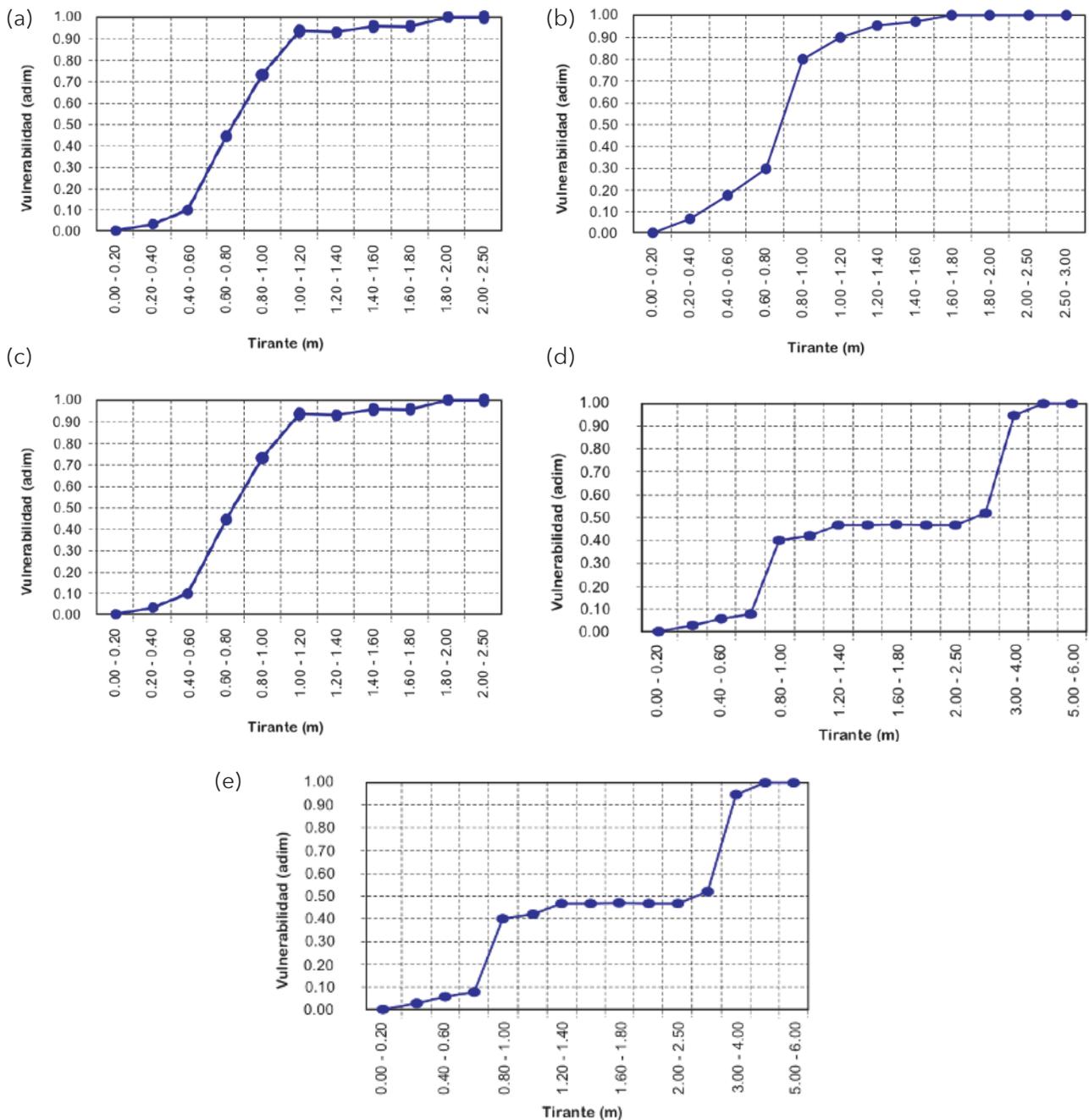
**Tabla 1. Estimación del costo y pérdidas por tipo de vivienda (CENAPRED, 2010).**

Clasificación	Descripción	Costo aproximado*
Tipo I.	Este tipo corresponde a los hogares más humildes una vivienda consta de un solo cuarto multifuncional construido con material de desecho. Asimismo, el menaje es el mínimo indispensable.	\$12,500.00.
Tipo II	El segundo tipo corresponde a hogares que pueden ser clasificados como de clase baja donde la vivienda puede ser descrita como una vivienda de autoconstrucción o viviendas construidas con materiales de la zona la mayoría de las veces sin elementos estructurales.	\$50,000.00.
Tipo III.	El tercer tipo de viviendas también puede ser clasificado como clase baja similar al tipo II pero con techos más resistentes construida la mayoría de las veces sin elementos estructurales.	\$150,500.00.
Tipo IV.	El cuarto tipo de viviendas se identifica como la típica para la clase media es decir que puede ser equiparada con una vivienda de interés social construida la mayoría de las veces con elementos estructurales.	\$300,000.00.
Tipo V.	Corresponde al tipo residencial construida con acabados y elementos decorativos que incrementan sustancialmente su valor	\$450,000.00

\*Valor estimado al año del evento

En el análisis socioeconómico que abarca desde Tipo I hasta Tipo V, comenzando con el nivel de inundación en la vivienda, se calcula el porcentaje de deterioro. Tomando como ejemplo una vivienda de Tipo 1 (Figura 6a), en la que se presentó una altura de inundación de 0.8 m. Esto resultaría en una vulnerabilidad del 0.45, equivalente al 45% del menaje (\$50,000). Como resultado, = \$22,500.

**Figura 6. Función de Vulnerabilidad por tipo de vivienda a) tipo I, b) tipo II, c) tipo III, d), tipo IV y e) tipo V.**



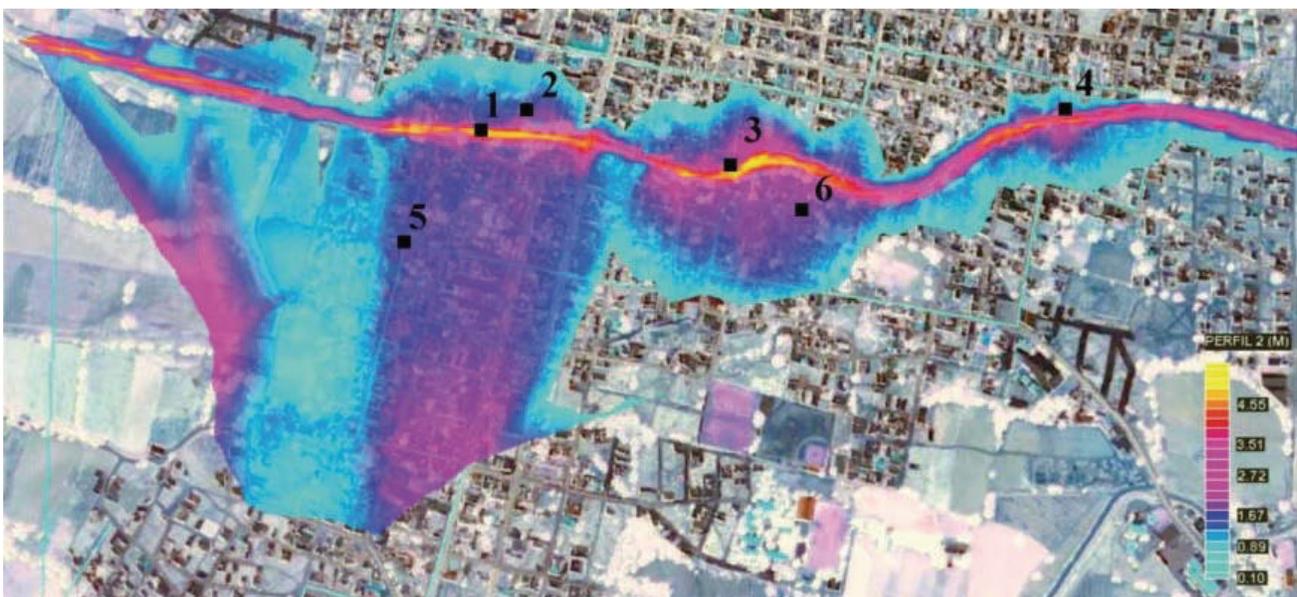
Finalmente, el Riesgo por inundación en Tlaltenango es el daño económico se calculará para el total de viviendas afectadas en la tormenta del 18 de julio de 2008.

## Resultados

En la simulación hidrológica HEC-1 se calculó un gasto máximo de 284 m<sup>3</sup>/s estimado a partir de los datos de lluvia que fue de 157 mm en 24 horas (Pineda-Martínez et al, 2014); este valor fue empleado en el análisis hidráulico del arroyo para determinar la extensión y profundidad de la inundación en la zona urbana.

De la simulación hidráulica (HEC-RAS), los resultados en las secciones transversales fueron tirante, energía, gasto, velocidad, área hidráulica y número de Froude. Empleando el archivo de las soluciones que definen las elevaciones de la superficie del agua, se interpolaron los valores para la delimitación de la llanura de inundación. De esta manera se determinaron los conjuntos de datos correspondientes a la planicie de inundación nuevas profundidades y niveles de agua (elevación del río y la profundidad de las inundaciones) en los puntos interpolados (Figura 7). Se presenta un tirante máximo de inundación de 5.34 m en el eje de cauce, para la zona urbana se presentó una inundación máxima de 2.7 m, siendo las viviendas más afectadas las localizadas en las márgenes del arroyo.

**Figura 7. Resultados de la simulación en HEC-RAS y su extensión en la zona urbana. Los puntos etiquetados corresponde a mediciones del tirante de inundación después de la avenida, permitiendo verificar con los valores obtenidos de la solución numérica.**



De la revisión histórica de las inundaciones, no se encontraron registros de niveles y extensiones de las afectaciones. Por tanto, este es el primer estudio basado en registros post-evento (marcas de inundación), modelos matemáticos y numéricos para la determinación de los escurrimientos y el mapeo de la zona afectada para el evento del 18 de julio de 2008.

Con el inventario de las características de las 1606 viviendas afectadas en la inundación, se realizó su clasificación por nivel socioeconómico. En función de los materiales de construcción y con el tipo de vivienda se determinó el índice de vulnerabilidad para cada uno de los niveles, realizando un mapeo según su clasificación, (Figura 8 y Tabla 2).

**Figura 8. Tipificación de las viviendas dentro del polígono de afectación. Vulnerabilidad tipo II (verde), tipo III (amarillo), tipo IV (naranja) y tipo V (rojo).**

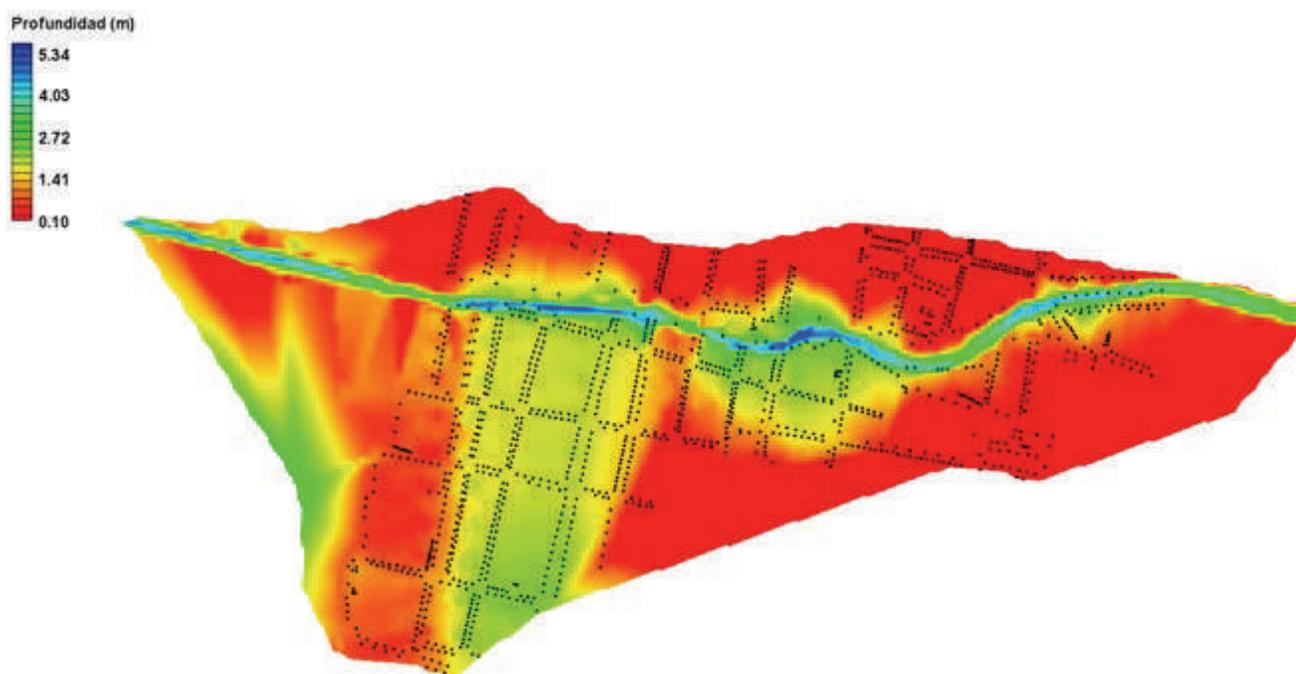


**Tabla 2. Inventario de viviendas, índice de vulnerabilidad y su semaforización.**

Tipo	Viviendas	Índice de vulnerabilidad	Color propuesto	Valor máximo de los daños
I	40	Alto	Rojo	\$12,500
II	---	Medio - Alto	Naranja	\$50,000
III	696	Medio	Amarillo	\$150,500
IV	317	Medio - Bajo	Verde	\$300,000
V	19	Bajo	Blanco	\$450,000

Para el cálculo del riesgo, se realizó asociando los tirantes obtenidos en el modelo hidráulico a los tipos de vivienda obtenidos en la estimación de vulnerabilidad. En la figura 9 se muestra el mapa de inundación donde se indican los tirantes obtenidos con el modelo hidráulico y los puntos representan a las viviendas afectadas. Para el análisis de riesgo se determinó la profundidad de inundación en cada una de las viviendas.

**Figura 9. Profundidades de inundación en el área afectada, los puntos corresponden a las viviendas afectadas respecto al tirante de inundación.**



Del análisis de riesgo, en la tormenta del 18 de julio del 2008 para las 1606 viviendas se estimó un riesgo con un monto de \$119,507,060.00.

### **Pérdidas económicas en negocios y comercios**

El análisis de riesgo no es viable para empresas o establecimientos comerciales, así que es esencial realizar encuestas y entrevistas a los propietarios, obteniendo la siguiente información: dirección, nombre, rubro y pérdidas. Se evaluaron 218 establecimientos (alimentación, construcción, servicios, indumentaria, salud), con 88 propietarias y 133 propietarios, con un perjuicio económico total de \$33,776,200.00.

## Conclusiones

Tras un análisis histórico, no se encontraron registros de los alcances y dimensiones de inundaciones pasadas. Por ende, este estudio pionero se apoya en modelos matemáticos y numéricos para estimar flujos y cartografiar el área impactada por el incidente del 18 de julio de 2008. Se presentó el desarrollo metodológico del análisis de riesgo por inundación en la localidad de Tlaltenango para la tormenta del 18 de julio de 2008. Se presentaron antecedentes históricos de inundaciones recurrentes. Se presentó el proceso de un modelo hidrológico, el proceso de generación, integración de la información de la cuenca para la transformación lluvia-escurrimiento para determinar la avenida de ingreso al arroyo El Xaloco con gasto máximo de 284 m<sup>3</sup>/s para las condiciones analizadas del evento de 2008. El análisis hidráulico basado en información topográfica de detalle del arroyo del Xaloco y de la zona urbana afectada, nos permitió obtener un modelo realista de las características del cauce y el escurrimiento generado por este evento. Se agregó al modelo hidráulico la información de la configuración de los puentes, usos de suelos, tipo de suelo, secciones transversales y rugosidades.

Los datos dados por la simulación hidrológica y la hidráulica ayudaron a completar la metodología para crear los mapas de la planicie de inundación y así poder superponer esta información en un SIG y el inventario de viviendas afectadas con su caracterización por prioridad en términos de vulnerabilidad. Los mapas creados posibilitaron la identificación de hogares más susceptibles en la zona inundable. Esto se basa en factores como el nivel del agua y la exposición. Se reconoce que la vulnerabilidad se vincula principalmente a factores físicos de las estructuras y a la afectación de servicios, así como a aspectos económicos que dificultan la capacidad de las familias para afrontar estas inundaciones.

Esta investigación busca trascender en futuros trabajos que refinen y mejoren las metodologías de evaluación de riesgo y vulnerabilidad ante inundaciones. Se propone la adopción de herramientas tecnológicas para garantizar precisión y agilidad en la información, minimizando errores y tiempos. Asimismo, se pretende integrar estos hallazgos en estudios urbanos para desarrollar indicadores que profundicen en el análisis de riesgo por inundación y permitan una evaluación más precisa de pérdidas, contribuyendo a la gestión, planificación urbana y prevención de desastres.

## Referencias

- Casas, B. C. (1986). Una ciudad amurallada: Tlaltenango. Imprenta Galve Guadalajara.
- CENAPRED (2010). Metodologías propuestas por el Cenapred para elaborar mapas de riesgo por inundación. Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.

- CENAPRED (2021). Impacto socioeconómico de los principales desastres ocurrido en México. Características e impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en México. Dirección de Análisis y Gestión de Riesgos Subdirección de Estudios Económicos y Sociales Centro Nacional de Prevención de Desastres, México.
- Dzul G. O. y A. Hotchkiss R. (2010). Cooperación universitaria internacional UAZ-BYU Modelación computacional de los recursos hidráulicos en Zacatecas. Informe final. Universidad Autónoma de Zacatecas, México.
- EM-DAT: The International Disaster Database. (2020). Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (cred) <http://www.emdat.be> consultado en agosto de 2023.
- INEGI (2010). Sistema de Descargas Del Continuo de Elevaciones Digitales (CEM), Continuo de Elevación Mexicano F13D16 y F13D26. Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, Aguascalientes, México.
- Hernández-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H., & Ramírez, A. I. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. Tecnología y Ciencias del Agua, México
- Jiménez M. P. (2018) Análisis del riesgo por inundación de la tormenta del 18 de julio de 2008 en la ciudad de Tlaltenango, Zacatecas, Tesis de maestría en ingeniería aplicada con orientación en recursos hidráulicos, Universidad Autónoma de Zacatecas, México.
- Montañez C. J. (1970). Ensayo geohidrológico del valle de Tlaltenango, México D. F.
- Montes J. G. (1972) Tlaltenango de Zacatecas (Geografía, Historia, Tradición y Anécdotas), Tlaltenango.
- Natural Resources Conservation Service (2008). National Engineering Handbook. 630 . Washington D.C.: Hydrology; U.S. Department of Agriculture.
- Pineda-Martínez, L. F., García, O. D., & Hotchkiss, R. H. (2014). Implications of maximum daily precipitation on streamflow of a watershed: a case study in Zacatecas, Mexico. International Journal of River Basin Management, 12(4), 411-418.
- Tucci C. E. (2007). Urban Flood Management", WMO/TD-No. 1372. World Meteorological Organization, Brazil.
- USACE HEC-1. (2000). "Hydrological Modeling Systems, HEC-1", Technical Reference Manual. Hydrological Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers, U. S. A.
- USACE HEC-RAS. (2010). River Hydraulics, HEC-RAS, Technical Reference Manual. Hydrological Engineering Center, U. S. Army Corps of Engineers, U. S. A.
- UNESCO. (2020). Agua y cambio climático - Datos y Cifras. WWAP En Nombre de ONU-Agua, 16. <https://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2020/> consultado en junio de 2023.
- UNESCO, ONU-Agua. (2020). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos, Agua y Cambio Climático, París, UNESCO
- Vega-Camarena, J. P., Brito-Castillo, L., Farfán, L. M., Gochis, D. J., Pineda-Martínez, L. F., & Díaz, S. C. (2018). Ocean-atmosphere conditions related to severe and persistent

droughts in the Mexican Altiplano. *International Journal of Climatology*, 38(2).  
<https://doi.org/10.1002/joc.5215>

Vega-camarena, J. P., Brito-castillo, L., & Pineda-mart, L. F. (2023). ENSO Impact on Summer Precipitation and Moisture Fluxes over the Mexican Altiplano.



## **Riesgo socioambiental asociado al fenómeno lluvia - escurrimiento en tiraderos de residuos sólidos urbanos en Ensenada, Baja California**

*Gámez Balmaceda, Ena del Carmen*

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, México. [egamez@cicese.mx](mailto:egamez@cicese.mx) ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9805-7758>

*González Acevedo, Zayre Ivone*

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, México. [zgonzale@cicese.mx](mailto:zgonzale@cicese.mx), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3293-0563>

*García Zárate, Marco Antonio*

Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, México. [margarci@cicese.mx](mailto:margarci@cicese.mx), ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3293-3000>

*López Lambraño, Alvaro Alberto*

Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México. [alopezl@uabc.edu.mx](mailto:alopezl@uabc.edu.mx), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7899-7985>

Autor de correspondencia: Ena del Carmen Gámez Balmaceda, [egamez@cicese.mx](mailto:egamez@cicese.mx), [enagamez@gmail.com](mailto:enagamez@gmail.com)

Citar este capítulo: Gámez-Balmaceda, E.C, González Acevedo, Z.I., García Zárate M.A., López-Lambraño A.A. (2024). Riesgo socioambiental asociado al fenómeno lluvia - escurrimiento en tiraderos de residuos sólidos urbanos en Ensenada, Baja California. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales Hernández, J. C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim, México. Pp: 139 - 159.

### **Resumen:**

Este estudio expone una aproximación del riesgo social y ambiental, derivados de actividades antropogénicas y naturales, asociado al fenómeno lluvia-escurrimiento en el municipio de Ensenada. Para lograr este objetivo se analizaron 152 tiraderos no regulados, obtenidos a partir de datos bibliográficos, con modelos de evaluación hidrológica para rellenos sanitarios. Los modelos utilizados fueron HELP de la Agencia

de Protección al Ambiente de EE. UU, y CORENOSTÓS de Colombia. Se emplearon datos de las características físicas de los tiraderos, datos climatológicos para el periodo 2008 a 2019, datos de cobertura vegetal, topografía y textura de suelo en diferentes capas superficiales del suelo. Se consideró como factor de amenaza la cantidad de lixiviados y gases obtenidos como una aproximación preliminar en el periodo evaluado. Los elementos expuestos analizados fueron la población, el suelo y el recurso hídrico. Entre los resultados principales, se identificó la zona de un acuífero, ubicado en la delegación de Maneadero, expuesto al peligro de contaminantes generados por 1,100 toneladas de basura por año, que producen aproximadamente 90 m<sup>3</sup> de lixiviados, de los cuales el 7% es percolado en las primeras tres capas del subsuelo. La población en riesgo por su salud, a consecuencia de la basura, se encuentra dentro de un radio de 500 m alrededor de los tiraderos, correspondiente a 167,110 personas. En el mismo radio se encontraron 172 escuelas expuestas a los gases y líquidos potencialmente tóxicos estimados.

Palabras clave: [Exposición, tiraderos de basura, agua.](#)

Línea temática: [Línea temática 2. Diagnóstico y análisis de procesos.](#)

## Introducción

Los escurrimientos superficiales en las zonas urbanas, ocasionados por las lluvias de diferente intensidad, pueden generar daños materiales directos e indirectos en viviendas, infraestructura y población (Baró Suárez *et al.*, 2012). Además de estos daños, los escurrimientos van acompañados de una amenaza colateral, el transporte de elementos potencialmente tóxicos, relacionado a las actividades antropogénicas, que representa un riesgo a la salud y a los recursos naturales (Gaffield *et al.*, 2003).

Con el propósito de identificar y analizar el riesgo al ambiente y la salud de las personas, se analiza la amenaza de contaminación, que resulta del manejo inadecuado de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU) al ser transportados a través del aire, suelo y agua. Este problema está presente en muchas ciudades del país (SEMARNAT, 2020), incluyendo Ensenada, Baja California, un municipio muy importante en el contexto económico (Padilla y Sotelo, 2016); donde se recolectan alrededor de 500 toneladas de basura por día con destino a un relleno sanitario, diseñado para evitar la percolación de lixiviados a las capas superficiales del suelo. Sin embargo, existen alrededor de 200 tiraderos no regulados de basura en la zona urbana, distribuidos en terrenos baldíos, cerros y arroyos, sin el manejo adecuado sobre la basura.

Como parte de la contribución a la identificación de amenaza que representan los RSU dispuestos en el municipio de Ensenada, este estudio tiene como objetivo hacer una estimación preliminar de la cantidad de líquidos y gases, como contaminantes producto de la biodegradación, en los tiraderos clandestinos de tres delegaciones municipales.

Para alcanzar este objetivo se analizaron los datos de los tiraderos reportados por Mendoza López (2012) con fecha de inicio en el año 2009, y algunos sitios reportados por distintos medios de comunicación hasta el año 2019 (apéndice). Este análisis consiste en la aplicación de modelos empíricos de evaluación hidrológica, de parámetros basados en datos climatológicos de un periodo seleccionado, la caracterización física de los sitios de disposición de la basura y de las condiciones del medio natural. Además, se realizó la delimitación de las cuencas que contienen estos sitios, para analizar los escurrimientos superficiales que podrían combinarse con lixiviados en su curso.

Las herramientas de modelación hidrológica ayudan a comprender el fenómeno lluvia - escurrimiento y facilitan la estimación, incluyendo el arrastre de cualquier otro líquido o sedimentos que resulten como contaminantes, así como la cantidad de drenaje subsuperficial e infiltraciones (Hernández-Uribe *et al.*, 2017; Schroeder *et al.*, 1994). En este sentido, se determinó la amenaza mediante el uso de dos herramientas, el modelo CORENOSTÓS de Colombia (Collazos, 2005), para la simulación de lixiviados y biogás, que se pueden presentar en un relleno sanitario (Gutiérrez-Gil *et al.*, 2018; Rivas-Armenta *et al.*, 2017), y el modelo HELP V 4.0 de la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) de Estados Unidos (Krause & Tolaymat, 2020), como complemento para la estimación de los escurrimientos y percolaciones de lixiviados (Muthukamara *et al.*, 2015; Podlasek, 2022). La generación de lixiviados, la concentración de contaminantes y el transporte por viento o escurrimiento superficial están influenciados por la hidrología de los sitios de disposición final (Mowjood *et al.*, 2013; Salles *et al.*, 2011).

Una vez definida la amenaza y con base a los datos del censo de población y vivienda de INEGI 2020 y a la NOM-083-SEMARNAT-2003; se consideraron como elementos expuestos:

La población cercana a los tiraderos no regulados

Los centros educativos

El suelo

Un acuífero expuesto en el área de estudio

Los arroyos intermitentes que confluyen en el mar

Las playas de Ensenada, que forman parte del atractivo turístico de la ciudad y por lo tanto de su economía.

## Teoría

El modelo CORENOSTÓS desarrollado por Collazos (2005) evalúa el proceso de llenado de un relleno sanitario, calculando los gases y lixiviados que se van produciendo. Dicha evaluación, considera procesos de biodegradación de los residuos orgánicos dispuestos y procesos de infiltración del agua de lluvia que entra en contacto directo con los lechos de basura tipo doméstica dispuesta. Define como lixiviado al líquido efluente de la

basura como consecuencia de la pérdida de humedad por descomposición bioquímica, por compactación y por infiltración de líquidos al lecho de basuras, y que, por arrastre, provoca la extracción de materiales disueltos o en suspensión (Echeverry y Collado, 2013).

El modelo considera que la descomposición de la basura inicia al momento en que se deposita alcanzando aproximadamente un 15% de descomposición al fin de su primer año. De este momento hasta terminar el quinto año se habrá descompuesto el 80%. Asume que la basura estará compuesta por agua, materiales putrescibles, papel, cartón, textiles, madera y poda de árboles, arena, plásticos, caucho, vidrio y metales. Calcula el conjunto de gases, compuestos de carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno; representados en la Eq. [1], que intervienen en la biodescomposición (Echeverry y Collado, 2013).



Las variables consideradas en el modelo CORENOSTÓS son: cantidad de basura dispuesta en el sitio, su clasificación en porcentaje de putrescibles, papel y cartón, textiles, jardinería y otros, al igual que su porcentaje de humedad, peso en toneladas por mes y año, tiempo en el que se va a depositar la basura, temperatura media del sitio, presión atmosférica, altitud, área expuesta al agua de lluvia, pendiente superficial del sitio, textura de suelo en la capa superficial, espesor del material, precipitación y evapotranspiración potencial mensual en el periodo evaluado.

El programa HELP es un modelo hidrológico desarrollado por la Agencia de Protección al Ambiente de EE. UU (EPA, por sus siglas en inglés) (Krause & Tolaymat, 2020) para el análisis del balance hídrico de vertederos, sistemas de cobertura e instalaciones de residuos sólidos. El modelo permite el diseño y mantenimiento de vertederos, por medio de la estimación rápida del escurrimiento, evapotranspiración, drenaje, la infiltración y otras vías hídricas para estimar la cantidad de agua que se acumula por encima del revestimiento de cada vertedero (Schroeder *et al.*, 1994).

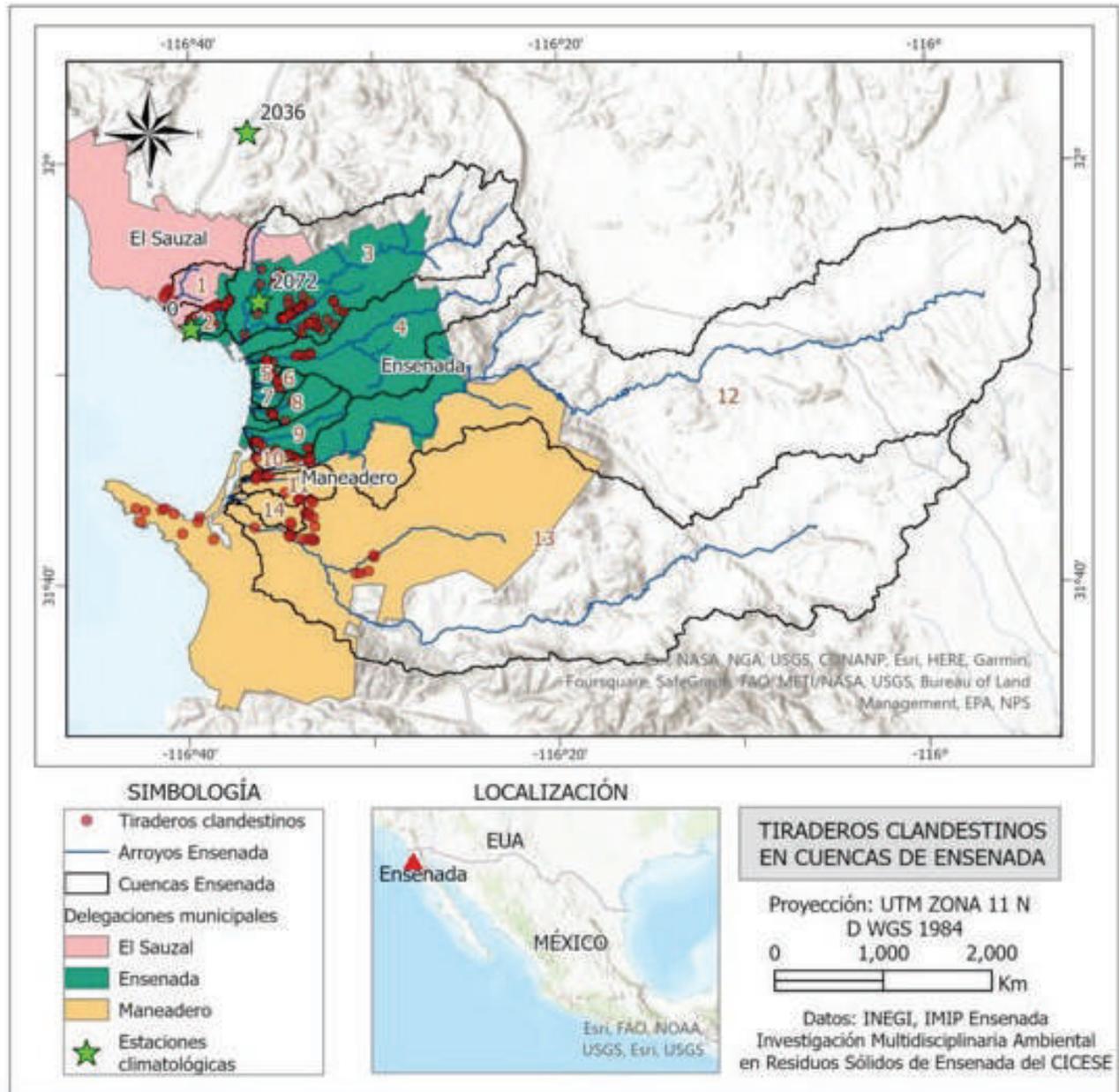
Este modelo realiza un análisis del balance hídrico para un periodo mínimo de un año, a partir de datos meteorológicos diarios, con un límite de tres estaciones climatológicas, no acepta una cantidad diferente de estaciones. Considera efectos de almacenamiento en superficie, escorrentía, infiltración, evapotranspiración, crecimiento vegetativo, almacenamiento de humedad en el suelo, drenaje subterráneo y subsuperficial. La infiltración diaria en el vertedero se determina indirectamente a partir de un balance de agua superficial. El modelo asume que cada día la infiltración es igual a la suma de la precipitación, menos la suma del escurrimiento, el almacenamiento superficial y la evaporación. El flujo percolado es descendente debido al drenaje por gravedad o extraído por evapotranspiración. Los escurrimientos superficiales son modelados por medio del método del número de curva (CN) del servicio de conservación de suelos de los Estados Unidos (SCS, 1972), para obtener este número de curva se requiere información del tipo

de suelo, pendiente del terreno y uso de suelo. La evapotranspiración potencial se calcula por medio del método Penman-Monteith para predecir la evaporación del suelo y la transpiración de las plantas. Para obtenerla se requiere información del tipo de vegetación e índice de área foliar (Schroeder *et al.*, 1994).

## Materiales y métodos

La zona de estudio corresponde al municipio de Ensenada, localizado en el noroeste de México, tiene un clima semiárido, con lluvias de tipo convectivas que se caracterizan por ser intensas y de corta duración. La precipitación promedio anual aproximada es de 254 mm (López-Lambraño *et al.*, 2016), donde la temporada de lluvias suele darse entre noviembre y abril. El rango de temperatura media anual oscila entre 14 y 18 °C (INEGI, 2016). El paisaje topográfico es variable, con pendientes pronunciadas, valles aluviales y una llanura costera aluvial (Smith *et al.*, 2007). El municipio de Ensenada está compuesto por 16 delegaciones municipales con 443,807 habitantes (INEGI 2020). En el municipio se tienen actividades económicas representativas del país: agricultura, pesca, industria, turismo, que derivan del clima, su ubicación en la zona fronteriza y el arribo de barcos comerciales y turísticos; que generan importancia económica y el incremento anual de la población (COPLADE, 2017).

La metodología empleada consiste en un proceso dividido en cinco etapas, caracterizadas por un compendio de datos obtenidos en diferentes fuentes de información. La primera etapa fue la selección de los tiraderos no regulados, que se llevó a cabo por medio de una revisión bibliográfica; artículos científicos, tesis y registros de diferentes medios de comunicación local (apéndice). De esta revisión se seleccionaron 152 tiraderos a cielo abierto, principalmente de Mendoza López (2012), por contener información sobre su localización geográfica, superficie (100 - 76,000 m<sup>2</sup>), antigüedad de los sitios, registrada en 2009 y dimensiones lineales. Estos tiraderos se encuentran distribuidos en terrenos baldíos, cerros y arroyos, de tres delegaciones municipales: El Sauzal, Ensenada y Maneadero (Figura 1).

**Figura 1. Localización de tiraderos clandestinos y cuencas en el área de estudio.**

La segunda etapa consistió en la caracterización de los tiraderos clandestinos, resultado de un análisis bibliográfico. Los espesores de la basura se obtuvieron por medio de una aproximación visual de las fotos de los sitios contenidas en Mendoza López (2012), y las fotografías publicadas en los medios de comunicación consultados (apéndice). Estos espesores se multiplicaron por el área contenida para obtener el volumen. Las toneladas de basura en cada sitio se obtuvieron mediante el cálculo del volumen por un peso volumétrico. El peso volumétrico de la basura varía en distintas partes del país, por estrato social, que va desde 140 kg/m<sup>3</sup> (García Vargas *et al.*, 2016) hasta 500 kg/m<sup>3</sup> (Susunaga-Miranda *et al.*, 2022). Sin embargo, al no contar con un estudio local sobre este peso, se adoptó el

peso volumétrico de 115.45 kg/m<sup>3</sup> reportado por SEMARNAT para la región Noroeste (SEMARNAT, 2020). La clasificación del tipo de basura también fue una aproximación visual de las fotos de los tiraderos reforzada por la caracterización de la basura en Ensenada realizada en 2009 (Hernández-Berriel *et al.*, 2016), de la siguiente manera: 30% material putrescibles, 20% papel y cartón, 20% textiles, 10% jardinería y 20% otros.

La tercera etapa continuó con la adquisición de datos del medio natural. Inició con la delimitación de las subcuencas, arroyos, la localización de los tiraderos en las subcuencas y la pendiente en que se encuentran, para modelar el escurrimiento superficial. Se delimitaron 14 subcuencas de la cuenca Todos Santos del municipio de Ensenada, 13 de ellas contienen tiraderos no regulados de basura (Figura 1). Este proceso se realizó a partir de un modelo de elevación LIDAR y la herramienta ArcGIS Pro. El resumen de las cuencas con las características de tiraderos no regulados se muestra en la Tabla 1.

**Tabla 1. Datos de tiraderos no regulados en subcuencas de Ensenada utilizados en las modelaciones de evaluación hidrológica para la estimación preliminar de**

Cuenca/ Ubicación	Tiraderos	Hectáreas	Pendiente (%)	Textura de suelo	Espesor subsuelo (cm)	Basura (Ton/ año)	Basura (Ton/mes)
1 - Sauzal	5	2.2	26.0	Arena	100	101.6	8.5
2 - Pedregal P	12	3.0	25.5	Arcilla, limo, arena	100	274.1	22.8
3 - Presa Emilio LZ	54	7.9	18.6	Arena	100	735.3	61.3
4 - El Gallo	9	1.1	15.6	Arena	100	132.4	11.0
5 - Playa Hermosa	5	0.6	14.3	Arcilla, limo, arena	100	69.6	5.8
6 - Valle Dorado	3	0.9	17.8	Arcilla, limo, arena	100	105.6	8.8
8 - Aeropuerto	6	1.8	16.2	Arcilla, limo, arena	100	208.5	17.4
9 - Chapultepec	8	1.5	18.4	Arcilla, limo, arena	100	169.9	14.2
10 - Manadero	4	8.1	10.3	Arcilla, limo, arena	100	930.8	77.6
11 - Manadero	5	0.3	8.4	Arcilla, limo, arena	100	34.6	2.9
12 - San Carlos	8	2.2	4.8	1-Arcilla y arena, 2 - Grava, arena, arcilla y cantos rodantes, 3 - Grava, arena y arcilla	5100	253.4	21.1

**Tabla 1. Datos de tiraderos no regulados en subcuencas de Ensenada utilizados en las modelaciones de evaluación hidrológica para la estimación preliminar de líquidos y gases generados por la basura. (Continuación).**

Cuenca/ Ubicación	Tiraderos	Hectáreas	Pendiente (%)	Textura de suelo	Espesor subsuelo (cm)	Basura (Ton/ año)	Basura (Ton/mes)
13 - Maneadero	21	9.4	12.2	Textura cuenca 12	5100	1,086.4	90.5
14 - Maneadero	2	0.1	20.0	Textura cuenca 12	5100	5.8	0.5
Esteban Cantú	10	0.5	21.3	Arcilla, limo, arena	100	2.1	0.2

Luego se determinó la textura de las capas superficiales del suelo, que corresponden a suelos tipo 1 (textura gruesa) con más de 65% de arena, menor capacidad de retención de agua y nutrientes para las plantas. Y suelos tipo 2 (textura media) denominados francos, equilibrados en el porcentaje del contenido de arena, arcilla y limo, la profundidad de estas capas de suelo va de 50 a 100 cm profundidad (INEGI, 2004). Se seleccionaron los datos de uso de suelo de INEGI para el cálculo de índice de área foliar y el indicador de humedad para el cálculo de la evapotranspiración requerido por ambos modelos, considerando una zona semiárida (Del Toro-Guerrero *et al.*, 2014). Siguiendo el procesamiento de datos, se seleccionaron las tres estaciones climatológicas requeridas por el modelo HELP, en la Figura 1 corresponden a 0, 2036 y 2072. Se obtuvieron datos diarios de precipitación y temperatura en el periodo 2009 a 2019. Estos datos se resumen en las Tabla 2 y Tabla 3.

**Tabla 2. Descripción de datos cartográficos utilizados en este estudio.**

Datos	Descripción	Fuente
Precipitación, temperatura, radiación solar, humedad relativa, velocidad del viento presión atmosférica	Datos diarios de estaciones automáticas, Guadalupe (2036), CICESE (0) y Emilio López Zamora (2072). Periodo 2008 a 2019	CICESE <a href="http://observatorio.cicese.mx/">http://observatorio.cicese.mx/</a>
MDT, regiones hidrológicas, uso de suelo y tipo de suelo (Mapa de edafología)	Modelo digital de elevación de alta resolución. LIDAR (5x5 m), cobertura vegetal y textura de suelo de 30 a 100 cm.	INEGI
Delegaciones municipales, escuelas, población y vivienda por de AGEBS y manzanas, incluye el índice de rezago social de 2020	Ubicación cartográfica con datos del censo de 2020.	IMIIP, INEGI Y CONEVAL. <a href="https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Interactivos_municipal.aspx">https://www.coneval.org.mx/Medicion/IRS/Paginas/Interactivos_municipal.aspx</a>

**Tabla 3. Precipitación y evapotranspiración anual obtenida del promedio de datos anuales de las tres estaciones utilizadas en este estudio (2036, 0, 2072).**

Año	Precipitación (mm)	Evapotranspiración (mm)
2008	279.34	151.24
2009	130.00	78.12
2010	364.00	160.32
2011	180.50	118.63
2012	364.23	179.95
2013	242.30	79.33
2014	85.70	51.02
2015	156.40	73.16
2016	280.40	230.00
2017	333.20	190.00
2018	196.24	109.23
2019	263.60	119.00

La cuarta etapa fue el modelado hidrológico con los programas CORENOSTÓS y HELP, a partir de los datos obtenidos en las etapas anteriores y adaptado a las características físicas de los tiraderos a cielo abierto. El periodo considerado fue de 2008 a 2019, tomando en cuenta la antigüedad de los basureros reportados desde 2009, con un año de excedencia, hasta 2019 de acuerdo con los datos climatológicos disponibles. El programa CORENOSTÓS hace una estimación aproximada de lixiviados y gases en los tiraderos, utiliza la textura de suelo únicamente de la primera capa del terreno y no determina las percolaciones. Como resultado indica el espesor que debería tener la capa superficial para evitar las percolaciones. En cambio, el programa HELP permite modelar diferentes estratos de suelo, y proporciona las percolaciones de líquidos combinados con la lluvia que se podrían dar en las capas de suelo modeladas. De tal manera que estos modelos se utilizaron para complementarse entre sí y poder analizar la amenaza.

En las subcuencas de la delegación Maneadero se obtuvo información estratigráfica de tres capas de suelo: de 0 a 9 m arcilla y arena, de 9 a 21 m grava, arena arcilla y cantos rodantes; de 21 a 51 m grava, arena y arcilla (Sarmiento López, 1996); éstas se modelaron en la zona donde se localiza el acuífero (Medellín-Azuara *et al.*, 2013). Todas las modelaciones se llevaron a cabo en cada uno de los tiraderos, pero sus datos se agruparon por subcuencas para el análisis de la amenaza en los arroyos. Por ejemplo, como se muestra en la Tabla 1, en la cuenca 1-Sauzal se encuentran 5 tiraderos, que fueron modelados individualmente, la suma total del área cubierta de los tiraderos fue de 2.2 hectáreas, sobre una capa superficial de suelo, de acuerdo al mapa de edafología, de 100

cm de espesor; las toneladas de basura aproximadas por año fue de 101.6, que resultó del peso reportado en 2012 entre su antigüedad reportada en 2009 (Mendoza López, 2012).

Finalmente, la quinta etapa consistió en la obtención de datos de elementos expuestos y su análisis para la identificación del riesgo. Como elementos expuestos, además de los elementos naturales como arroyos, acuíferos y el agua de mar, se consideró a la población cercana a los tiraderos no regulados, dentro de un radio de 500 m, incluyendo a los centros educativos. Se adoptó este radio con base en el reglamento de manejo de residuos sólidos urbanos de Ensenada (2008) y la NOM-083-SEMARNAT-2003 sobre la ubicación de sitios de disposición final, donde se indica que los sitios deben estar a una distancia mínima de 500 m de la población y de áreas inundables. Los datos utilizados en este análisis fueron las manzanas de las tres delegaciones, con datos del censo de población y vivienda del censo 2020 de INEGI y centros educativos obtenidos de INEGI. En suma, a estos datos se incluyó el índice de rezago social a nivel de áreas geoestadísticas urbanas (AGEBs), que está conformado por áreas geográficas ocupadas por un conjunto de manzanas, definido por el Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social (CONEVAL, 2021), con base en el Censo de Población y Vivienda 2020 de INEGI. Este índice de rezago social se utilizó como un indicador social de vulnerabilidad en el análisis de este estudio para la identificación del riesgo en la población expuesta.

## Resultados

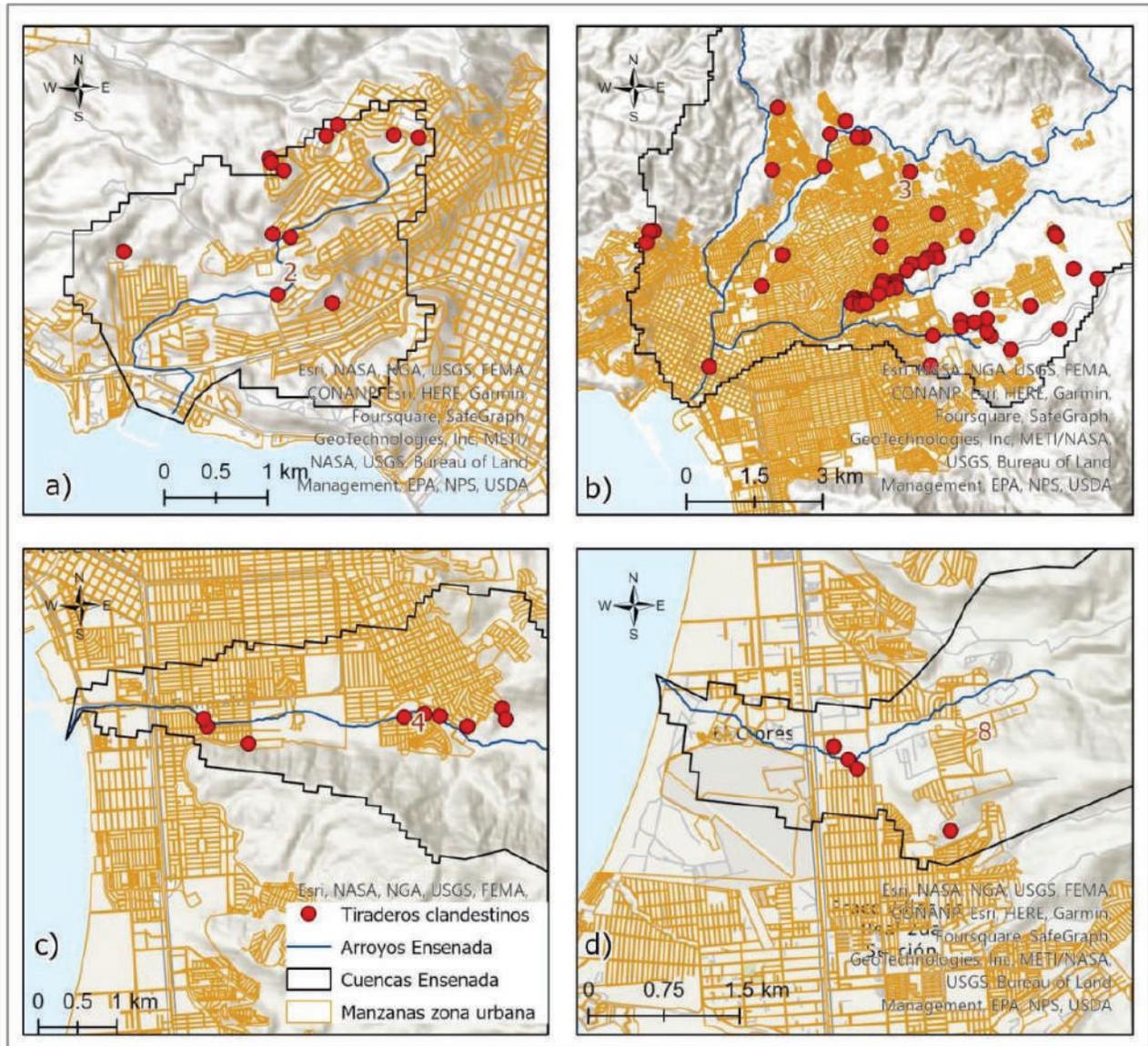
Se obtuvieron estimaciones de la cantidad de biogás y lixiviados con el modelo CORENOSTÓS y percolaciones que se podrían generar por la basura dispuesta en cada uno de los tiraderos clandestinos con el programa HELP. El programa CORENOSTÓS mostró que se estarían produciendo de 280 a 284 m<sup>3</sup> de gases por tonelada descompuesta, correspondiente a dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y metano (CH<sub>4</sub>) liberado en la fermentación anaeróbica de la basura, para el rango de temperaturas de 14 a 18 °C.

Como se muestra en la Tabla 4, el resultado de las estimaciones preliminares de lixiviado en cada tiradero se agrupó por subcuencas y por arroyos que conducen sus escurrimientos al mar (Figura 2). En los tiraderos localizados en los arroyos de las subcuencas 2, 3, 4 y 8 se produjeron lixiviados y escurrimientos que van del 0.8 a 12% del agua precipitada en promedio anual. Con base en el conocimiento de que en estos arroyos se generan grandes escurrimientos de agua precipitada para periodos de retorno de 10, 25, 50 y 100 años (B.C, 2014; Gámez-Balmaceda *et al.*, 2020; Torres *et al.*, 2012), y se presentan inundaciones en cada periodo, los resultados indicarían, de acuerdo al periodo modelado 2008-2019, que parte del lixiviado generado en los arroyos se mezcló con los escurrimientos de las inundaciones ocurridas en años anteriores, y pudo contribuir a la contaminación de las playas de Ensenada.

**Tabla 4. Amenaza de lixiviados que se generan en cada una de las subcuencas de Ensenada por tiraderos clandestinos y elementos expuestos. NBA indica que no se encontraron basureros en los arroyos.**

Subcuenca/ Ubicación	Subcuenca/ Ubicación	Aproximación de percolaciones promedio anual (%)	Aproximación de lixiviados de tiraderos en arroyos (m <sup>3</sup> /año)	Escurrecimiento promedio anual (%) de tiraderos en arroyos	Elementos expuestos cercaños a tiraderos clandestinos
1 - Sauzal	12.06	42	NBA	NBA	Población
2 - Pedregal P	23.99	41.48	0.53	0.84 - 1.3	Población y arroyo
3 - Presa Emilio LZ	51.88	35.63	10.32	1.94 - 10	Población, arroyo y escuelas
4 - El Gallo	1.82	40	8.63	1.66 - 19	Población y arroyo
5 - Playa Hermosa	9.52	42.08	NBA	NBA	Población y escuelas
6 - Valle Dorado	13.46	41.79	NBA	NBA	Población y escuelas
8 - Aeropuerto	17.183	41.35	0.5	1.25 - 8.24	Población
9 - Chapultepec	24.49	42.68	NBA	NBA	Población
10 - Maneadero	118.21	31.91	NBA	NBA	Población y escuelas
11 - Maneadero	4.76	12.39	NBA	NBA	Población
12 - Maneadero	34.42	7.99	NBA	NBA	acuífero
13 - Maneadero	90.40	7.57	1.52	1.7 - 12%	acuífero
14 - Maneadero	1	7.82	NBA	NBA	acuífero
Esteban Cantú	2.1	42.7	NBA	NBA	Población

**Figura 2.** Exposición de arroyos ante la amenaza de lixiviados generados por tiraderos clandestinos.



Como se observa en la Tabla 4, las subcuencas con mayor cantidad de lixiviados estimados corresponden a la cuenca 3 de la zona centro de Ensenada y las cuencas 10 y 13 de Maneadero. Las percolaciones máximas estimadas, después de la primera capa, fueron aproximadamente del 43% en los suelos donde se ubican los tiraderos, compuestas con lluvia y lixiviado.

En la zona de las cuencas 11 a 14 se encuentra expuesto un acuífero (Figura 3) a una profundidad de aproximadamente 650 m (Daesslé *et al.*, 2005). Sin embargo, el programa permitió modelar los tiraderos con tres estratos de suelo con una columna de 51 m. A

esta profundidad se obtuvieron percolaciones que van de 7.57 a 12.39%, después de la tercera capa de suelo modelada.

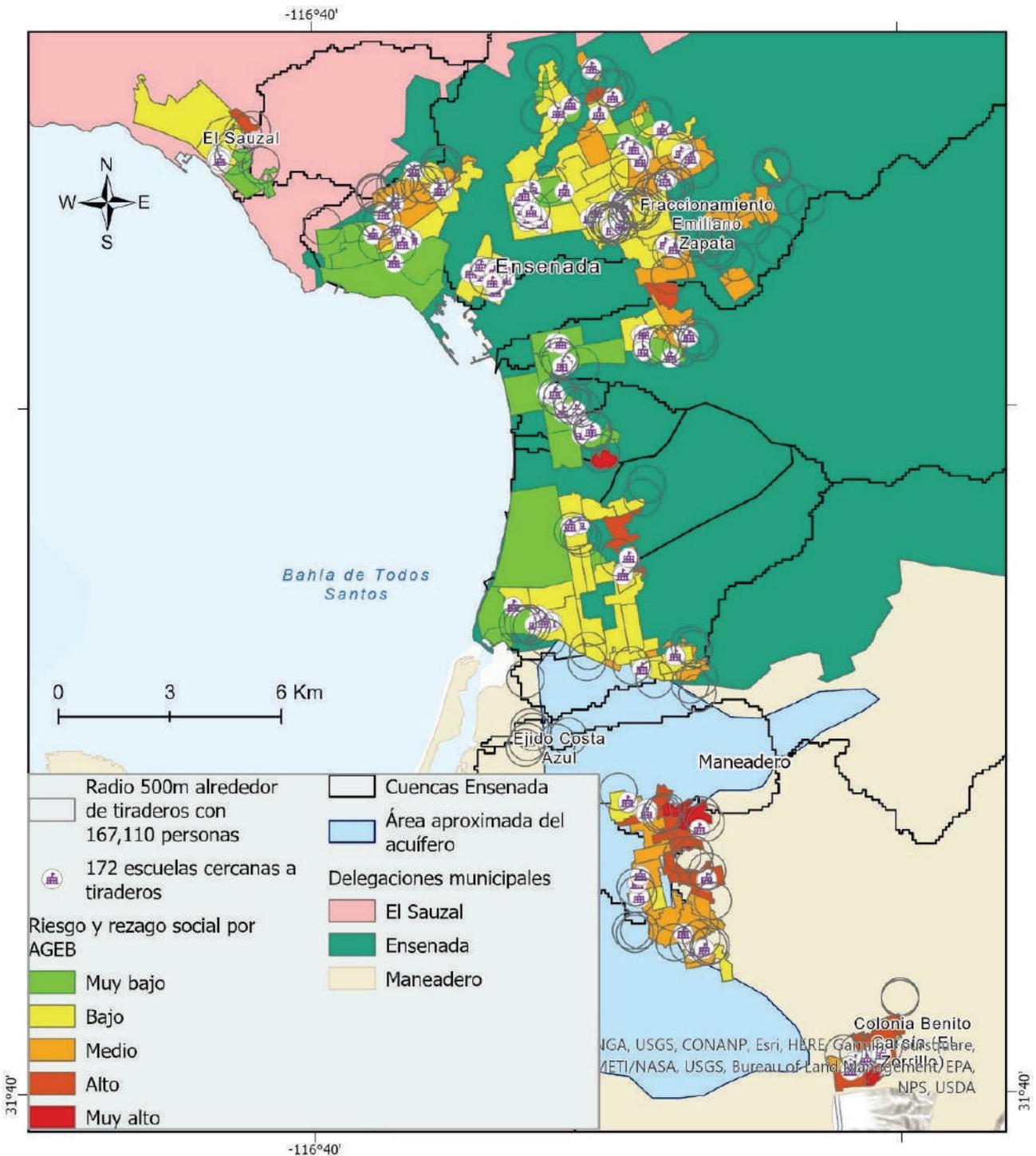
La cantidad de lixiviado producido en los tiraderos no regulados, se ha considerado una amenaza para el subsuelo y el agua pluvial de los arroyos, ya que se encontró que gran parte se infiltra en suelo y otra se escurre y es arrastrada hacia el mar. Si continúa el mismo hecho, al combinarse los lixiviados con el agua de mar, y las aguas residuales tratadas o semi tratadas, se expone la salud de las personas que se recrean en las playas de Ensenada, o se produce el cierre de las playas como ha ocurrido en varias ocasiones (apéndice), de tal manera que se pone en riesgo la economía que depende del turismo de las playas de Ensenada.

Como elementos expuestos se consideró en este estudio a la población y las escuelas cercanas a los tiraderos no regulados en un radio de 500 m. En este radio se encontraron 3,321 manzanas expuestas, con un total de 49,067 viviendas y 172 escuelas. En la delegación de El Sauzal se encontraron expuestas 2,003 viviendas con una población total de 4,067 personas; en la delegación de Ensenada se encontraron expuestas 41,225 viviendas y una población total de 140,978 personas, y en la delegación de Maneadero se encontraron expuestas 5,809 viviendas y una población total de 22,065 personas con un índice de rezago social que va de alto a muy alto (Figura 3). En relación a la población expuesta se consideró como factor de amenaza los gases que se producen en los tiraderos, y son un riesgo para la salud de las personas (SEMARNAT, 2019). Entre los efectos que puede sufrir la población por el CO<sub>2</sub> producido están: dolor de cabeza, mareos, nerviosismo, parestesia; disnea (dificultad para respirar); sudoración, malestar general (sensación vaga de malestar); aumento de la frecuencia cardíaca, gasto cardíaco, aumento en la presión arterial, estado de coma, asfixia, convulsiones, etc. El CH<sub>4</sub> tendría efectos en la población de irritar los pulmones, los ojos y la piel (Cárdenas-Moreno *et al.*, 2017).

Para clasificar el riesgo al que se encuentra expuesta la población se utilizó el índice de rezago social, como un factor de vulnerabilidad social. Este índice, calculado por el CONEVAL en 2020, está asociado a la carencia de la calidad de vida, el acceso a los servicios básicos, acceso a la salud, educación y alimentación nutritiva (Baja California, 2022). Cuando el índice es alto, se encuentra una población marginada, de bajos ingresos, gente que vive cerca de los tiraderos, personas que viven en situación de indigencia haciendo uso de la basura y crean más basura. Al mismo tiempo son vulnerables a los efectos, están en mayor exposición a sufrir enfermedades y no cuentan con los recursos para enfrentarse, carecen de servicios incluyendo la derechohabiencia de la salud. Cuando la población está expuesta al mismo nivel de amenaza, lo que determina el riesgo, es la vulnerabilidad: a mayor vulnerabilidad, mayor riesgo. Otro elemento en riesgo que se ha identificado, a causa de los posibles contaminantes por lixiviados, fue la economía que

se podría afectar por la disminución en la producción agrícola, o la disminución de la actividad turística por el cierre de las playas de Ensenada debido a la contribución de contaminantes.

**Figura 3. Nivel de riesgo dentro de un radio de 500 metros a los tiraderos no regulados.**



## Conclusiones

Los resultados de las modelaciones obtenidas con los programas HELP y CORENOSTÓS indican que existe la amenaza de contaminación por lixiviados hacia el suelo y el agua de los arroyos que confluyen en el mar. Esto implica que la basura depositada en estos tiraderos no regulados está contribuyendo a que el agua de las playas de Ensenada no esté en buenas condiciones para la población y turistas que las usan.

El empleo del primer modelo fue necesario para analizar cuanto lixiviado se podría generar por año y el segundo modelo para conocer cómo sería su transporte superficial o percolación en las diferentes capas del suelo. Lo cuál hace útil el empleo de ambos modelos en este tipo de análisis.

La identificación de la amenaza a través de las estimaciones obtenidas, con una muestra de los elementos expuestos permitió identificar parte del riesgo al que se encuentra la población por la mala disposición de los residuos sólidos. En el área del acuífero, correspondiente a la delegación de Maneadero no fue posible determinar la amenaza en su totalidad por falta de datos. Sin embargo, se pudo observar que a la profundidad de 51 m existen percolaciones de agua con lixiviados. Por lo tanto, es importante que se considere este dato para tomar acciones y no afectar la agricultura que se da en esta zona.

Los valores obtenidos a través de los modelos empleados están basados en técnicas empíricas o semiempíricas. Adicionalmente, los datos utilizados resultaron de una revisión bibliográfica. No se incluyeron mediciones físicas o químicas, ni ensayos de laboratorio, y se trabajó solo con los datos climatológicos disponibles. Por lo tanto, los resultados obtenidos son una aproximación preliminar de los gases y lixiviados, no pretenden sustituir los datos de laboratorio o datos generados sobre el terreno. Sin embargo, estos resultados representan una base y justificación para llevar a cabo estudios para la obtención de datos y dar continuidad a este estudio a través de verificaciones en campo.

Los resultados de este estudio constituyen una estimación mínima de los lixiviados y gases que podrían esperarse, para identificar la amenaza y riesgo que representa la mala disposición de la basura. Sirven para dar a conocer que existe un problema y que debe atenderse. A pesar de estas estimaciones, los resultados que se reportan pueden servir como punto de partida para dar seguimiento a este problema. Las acciones de gestión de los residuos deben abordarse en colaboración con diversas disciplinas de manera constante para preservar el desarrollo.

## Agradecimientos

Se agradece el apoyo del Grupo Interdisciplinario de Investigación en Sustentabilidad de Ensenada (GRIINS), CICESE, al IMIP Ensenada por la facilitación de datos de los tiraderos no regulados, y al departamento de meteorología del CICESE por los datos climatológicos.

## Referencias

- Ayuntamiento de Ensenada. (2021). 4 de enero de 2021, la recolección de basura incrementó cerca de un 80 por ciento en comparación con 2019. <https://www.ensenada.gob.mx/?p=7308>.
- Ayuntamiento de Ensenada. (2008). Reglamento de manejo de residuos sólidos urbanos y aseo público para el municipio de Ensenada, Baja California.
- Baja California C. E. de P. C. (2014). Atlas de Riesgos de Baja California. Obtenido de <http://www.proteccioncivilbc.gob.mx/Atras/BajaCalifornia.html>
- Baja California. (2022). Secretaría de Bienestar. Diagnóstico del Entorno de Baja California 2022-2027. Obtenido de : <https://bajacalifornia.gob.mx/Documentos/coplade/Diagn%C3%B3stico%20del%20Entorno%20de%20Baja%20California%20PED%20BC%202022-2027.pdf>
- Baró Suárez, J. E., Días Delgado, C., Calderón Aragón, G., Esteller, M., Cadena, E., & Franco, R. (2012). Metodología para la valoración económica de daños potenciales tangibles directos por inundación.
- Cárdenas-Moreno, P. R., Robles-Martínez, F., Colomer-Mendoza, F. J., & Piña-Guzmán, A. B. (2017). Herramientas para la evaluación de riesgos sobre el ambiente y salud, por la disposición final de residuos sólidos urbanos. *Revista Internacional De Contaminación Ambiental*, 32, 47-62. <https://doi.org/10.20937/RICA.2016.32.05.04>
- COPLADE (2017). Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado. Enero 2017. *Publicaciones Sociodemográficas/Baja California*, (55), 1-8. Obtenido de <http://www.copladebc.gob.mx/publicaciones/2017/Mensual/Ensenada2017.pdf>.
- Collazos H. (2005). Diseño y operación de rellenos sanitarios, Bogotá D.C. (Colombia): Escuela Colombiana de Ingeniería, 2005, 233 p
- CONEVAL (2021). Consejo Nacional de Evaluación de la Política de Desarrollo Social. Comunicado No. 4. El CONEVAL presenta el Índice de Rezago Social 2020/ Ciudad de México a 26 de abril de 2021.
- Echeverry Jaime y Collazo Héctor (2013). Corenostós. Tercera versión.
- Daesslé, L. W., Sánchez, E. C., Camacho-Ibar, V. F., Mendoza-Espinosa, L. G., Carriquiry, J. D., Macías, V. A., & Castro, P. G. (2005). Geochemical evolution of groundwater in the Maneadero coastal aquifer during a dry year in Baja California, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 13(4), 584-595. <https://doi.org/10.1007/s10040-004-0353-1>
- Del Toro-Guerrero, F. J., Kretschmar, T., & Hinojosa-Corona, A. (2014). Estimación del balance hídrico en una cuenca semiárida, El Mogor, Baja California, México. *Tecnología*

- y Ciencias Del Agua, 5(6), 69-81. Obtenido de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222014000600005&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000600005&lng=es&nrm=iso&tlng=es).
- Gaffield, S. J., Goo, R. L., Richards, L. A., & Jackson, R. J. (2003). Public Health Effects of Inadequately Managed Stormwater Runoff. *American Journal of Public Health*, 93(9), 1527-1533. <https://doi.org/10.2105/AJPH.93.9.1527>.
- Gamez Balmaceda E., López Lambraño A., Villacís C., Seingier G., Rivera H., Barós Suárez J. (2020). Metodología multidisciplinar en la evaluación integral del riesgo de inundación: caso de estudio Ensenada B.C., México. En: Morales, González, Welsh y Frausto. *Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos*. México, AM Editores, p. 71 a 95.
- García Vargas M.C.; Rangel García E.I.; García Arreola A. (2016). Caracterización de los Residuos Sólidos Urbanos. *Amecider*, 1-20. Obtenido de <http://ru.iiec.unam.mx/3252/1/276-Garcia-Rangel-Garcia.pdf>
- Gutiérrez-Gil, V., Zafra-Mejía, C., & Alarcón-Hincapié, J. (2018). A Preliminary Study to Forecast the Leachate and Biogas Generation in a Municipal Solid Waste Landfill in Latin America. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(19), 14386-14392. Obtenido de <http://www.ripublication.com>
- Krause, M., & Tolaymat, T. (2020). Hydrologic Evaluation of Landfill Performance: HELP 4.0 User Manual. United States Environmental Protection Agency, (January), 47.
- Hernández-Berriel M. A., Aguilar-Virguen Q., Taboada-Gonzalez P., Lima-Morra R., Eljaiek-Urzola M., Márquez-Benavides L., Buerostro-Delgado O. (2016). *Rev. Int. Contam. Ambie.* 32 (Especial Residuos Sólidos) 11-22, 2016. DOI: 10.20937/RICA.2016.32.05.02
- Hernández-Urbe R., Héctor Barrios-Piña, B., Aldo Ramírez, B. I., & para correspondencia Resumen Hernández-Urbe, A. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 8(3), 5-25. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222017000300005](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222017000300005).
- INEGI (2004). *Guías para la interpretación de Cartografía Edafología*. ISBN 970-13-4376-X
- INEGI (2016). Instituto Nacional de Estadística y Geografía (México). *Estudio de información integrada de la Cuenca Río Tijuana y otras*. INEGI, c2016. ISBN 978-607-739-997-1.
- INEGI (2020). Comunicado de prensa núm 30/21. Censo 2020. <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>.
- López-Lambraño, A., Fuentes, C., López-Ramos, A., López-L, M., & Pliego-Díaz, M. (2016). Rainfall Series Fractality in the Baja California State. *Environmental Science and Engineering*. Springer, Cham, 139-152. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-27965-7>
- Medellín-Azuara, J., Mendoza-Espinosa, L., Pells, C., Lund, J. R., Center for Watershed Sciences, & The Nature Conservancy. (2013). Pre-Feasibility Assessment of a Water Fund for the Ensenada Region Infrastructure and Stakeholder Analyses, (June), 104. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2655.9127>

- Mendoza López, M. H. (2012). Proliferación de tiraderos clandestinos, una práctica para disponer de los residuos sólidos urbanos en la ciudad de Ensenada. Tesis de Maestría COLEF-CICESE.
- Mowjood, M. I. ., Abhayawardan, P., Bandara, M., Hettiarachchi, S., Takahiro, K., Herath, G., ... Kawamoto, K. (2013). Groundwater level fluctuation in an open solid waste dumpsite : A case study in Groundwater level fluctuation in an open solid waste dumpsite : A case study in Udapalatha PS, Central Province , Sri Lanka, (September 2013). <https://doi.org/10.13140/2.1.4831.0407>
- Muthukamara, Kumarasinghe, Mowjood, Nagamori, Isobe, Watanabe, ... Kawamoto. (2015). Estimation of Leachate generation using HELP model in an open dumpsite in Sri Lanka. 3rd International Symposium on Advances in Civil and Environmental Engineering Practices for Sustainable Development (ACEPS-2015), (April)
- NOM-083-SEMARNAT. (2003). Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 20 de octubre de 2004.
- Padilla y Sotelo, L. (2016). Diversificación sectorial y proyección internacional del municipio de Ensenada. Revista Transporte y Territorio. Num. 15. Pp. 241-273.<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=333047931015>
- Podlasek, A. (2022). Modeling leachate generation: practical scenarios for municipal solid waste landfills in Poland. Environmental Science and Pollution Research, 30(5), 13256-13269. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-23092-8>
- Rivas-Armenta, M.E., Sierra-Camargo, L.D., Vélez-Pereira, A.M., (2017). Modelación de la producción de metano en el Relleno Sanitario Parque Ambiental Palangana (Santa Marta). Ingeniería Investigación y Tecnología, 18 (02), 183-192. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n2.016>
- Rojas Valencia, M.N.yC. Sahagún Aragón. (2012). Tiraderos a cielo abierto, Ciencia y Desarrollo. 259. <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/archivo/259/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto.html>
- Salles, A., Wolff, D. B., & Silveira, G. L. (2011). Solid wastes drained in an urban river sub-basin. Urban Water Journal, (1), 1-8. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2011.633612>
- Sarmiento López, C. (1996). Modelo preliminar de flujo tridimensional del acuífero de la planicie costera del Valle de Maneadero, B.C., México. Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. 157 hojas.
- Schroeder, P. R., Dozier, T. S., Zappi, P. A., Mcenroe, B. M., Sjostrom, J. W., & Peyton, R. L. (1994). The hydrologic evaluation of landfill performance (Help) model, 104.
- SCS. (1972). Section 4: Hidrology. In National Engineering Handbook. Washington DC: Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture.
- SEMARNAT. (2019). Tiraderos a cielo abierto dañan ambiente y salud humana. Obtenido de <https://www.gob.mx/semarnat/articulos/tiraderos-a-cielo-abierto-danan-ambiente-y-salud-humana?idiom=es>

- SEMARNAT. (2020). Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos Primera. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- Smith S. V., Bullock S. H., Hinojosa-Corona A., Franco -Vizacaino E., Escoto-Rodriguez M., Kretzchmar T. G., Farfan L. M., S.-C. J. M. (2007). Soil erosion and significance for carbon fluxes in a mountainous mediterranean-climate watershed. *Ecological Applications*, 17(5), 1379-1387.
- Susunaga-Miranda, M. A., Ortiz Muñiz, B., Castañeda Chávez, M. del R., Lango Reynoso, F., & Hernández Berriel, M. del C. (2022). Sitios de disposición final de residuos sólidos abandonados en la Región de Sotavento del estado de Veracruz, México, utilizando herramientas SIG. *Enfoque UTE*, 13(4), 11-28. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.853>
- Torres, C., Larios, S., Correa, F., García, J., & Gálvez, A. (2012). Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Ensenada 2012. Universidad Autónoma Del Estado de Baja California, ISBN: 978-607-607-091-8, ((607-607)). <https://doi.org/DOI10.13140/2.1.4426.3206>

## Apendice

**Tabla 5. Tiraderos clandestinos de Ensenada reportados por distintos medios de comunicación.**

Fotos de tiraderos clandestinos en Ensenada	Fecha	Fuente
	Enero 2022	Fotoperiodista Alejandro Zepeda  <a href="https://www.facebook.com/alejandrozepedaphotographer/photos/a.149894195631157/967826773837891/">https://www.facebook.com/alejandrozepedaphotographer/photos/a.149894195631157/967826773837891/</a>
	Diciembre 2021	Agencia fronteriza de noticias <a href="https://afntijuana.info/informacion-general/124094_lleenan_de_basura_el_arroyo_ensenada">https://afntijuana.info/informacion-general/124094_lleenan_de_basura_el_arroyo_ensenada</a>
	Julio de 2021	Zona norte noticias <a href="http://zonanorte.mx/main/mozaico/nid/1313">http://zonanorte.mx/main/mozaico/nid/1313</a>
	Enero 2020	Ensenada Sin Censura  <a href="https://www.facebook.com/EnsenadaSinCensura/posts/ensenada-basurero-clandestino-en-villas-del-roblemeses-sin-pasar-la-basura-en-el/500712203976449/?locale=es_LA">https://www.facebook.com/EnsenadaSinCensura/posts/ensenada-basurero-clandestino-en-villas-del-roblemeses-sin-pasar-la-basura-en-el/500712203976449/?locale=es_LA</a>
	Agosto 2019	El imparcial <a href="https://www.elimparcial.com/tijuana/ensenada/Cobran-hasta-100-pesos-por-llevarse-la-basura-en-Ensenada-20190815-0028.html">https://www.elimparcial.com/tijuana/ensenada/Cobran-hasta-100-pesos-por-llevarse-la-basura-en-Ensenada-20190815-0028.html</a>

**Tabla 5. Tiraderos clandestinos de Ensenada reportados por distintos medios de comunicación.**

 <p><small>Problemas de basura en Ensenada. Datos al medio ambiente y riesgo a la salud. Fotógrafo Ricardo Mena Guezo   plex</small></p> <p><small>Los residentes de Los Encinos señalan que la situación ha permanecido igual durante años, pasan a balde y el problema sigue igual.</small></p>	<p>Enero 2020</p>	<p>Peridismo Plex  <a href="https://plexmx.info/2020/01/06/ensenada-basurero-a-cielo-abierto/">https://plexmx.info/2020/01/06/ensenada-basurero-a-cielo-abierto/</a></p>
	<p>Enero 2020</p>	<p>Rada-noticias información de Ensenada  <a href="https://radanoticias.info/siembras-de-ejidatarios-en-riesgo-por-basureros-clandestinos/">https://radanoticias.info/siembras-de-ejidatarios-en-riesgo-por-basureros-clandestinos/</a></p>
	<p>Enero 2020</p>	<p>El Vigía  <a href="https://www.elvigia.net/general/2020/1/15/reclaman-en-manadero-por-basura-en-los-arroyos-342014.html">https://www.elvigia.net/general/2020/1/15/reclaman-en-manadero-por-basura-en-los-arroyos-342014.html</a></p>



# 9

## Sequía y crecimiento de la enfermedad del dengue en México

*Carlos Contreras Servín*

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, CIACyT, San Luis Potosí, México, coser@uaslp.mx, ORCID: 0000-0003-2221-1565

*María Guadalupe Galindo Mendoza*

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, CIACyT, San Luis Potosí, México, ggm@uaslp.mx, ORCID: 0000-0001-8775-5120

*Álvaro Gerardo Palacio Aponte*

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, FCSyH, San Luis Potosí, México, alvaro.palacio@uaslp.mx, ORCID: 0000-0002-5020-2482

Citar este capítulo: Contreras Servín, C, Galindo Mendoza, M.G. y Palacio Aponte, A. G. (2024). Relación de la sequía con la variabilidad climática y la expansión del dengue en México. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales Hernández, J. C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del Riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim, México. Pp: 161 - 171.

### Resumen:

Los insectos llegan a adaptarse a combinaciones de las variables climáticas, lo cual se considera una de las causas del calentamiento climático, quedando demostrado que los brotes de insectos, tanto en zonas templadas como tropicales, han seguido a periodos sequía y humedad excesiva. Es dentro de este contexto, que el mosquito transmisor del dengue, *Aedes aegypti*, es un ejemplo de adaptación de una especie al ámbito humano, la forma en que esta enfermedad se establece y expande, tiene estrecha relación con el hábitat del vector, pero también en gran medida con la variabilidad y el cambio climático, motivo por el cual, la presente investigación pretende explicar la forma en que diferentes variables meteorológicas se relacionan con el registro anual de casos de dengue en México. Sin embargo, solo hasta fechas recientes, se ha comenzado a relacionar los cambios periódicos y extraordinarios del clima y el modelo global de predicción del fenómeno de "El Niño" y su relación con una mayor expansión de plagas y enfermedades.

Palabras clave: Variabilidad climática, fenómeno de "El Niño", Dengue.

Línea temática: Diagnóstico y análisis de procesos.

## Introducción

Hace tan solo unas décadas, el impresionante avance científico alcanzado en el campo de la detección, el diagnóstico y el tratamiento de enfermedades, nos hizo pensar que en esta centuria las enfermedades transmisibles por vector (ETV) como es el caso del Dengue, pasarían a ser parte de la historia del siglo XXI; pero la realidad es que los problemas que esta enfermedad genera todavía están lejos de ser resuelto (Galindo y Contreras, 2019). En México, en los últimos 19 años hay más de 114,681 de dengue, cuyo epifocos endémicos se encuentran localizados en 7 estados del país (hacia el sureste) y el 35% (a partir del 2013) se localizan en nuevas áreas del norte de la República, donde no se tenían registros históricos. Las ETV reciben poca atención y se ven postergadas en las prioridades de salud pública porque los afectados carecen de influencia política; en contraste con los 49 millones de enfermos por estilo de vida, que son los que reciben mayor atención y financiamiento (Galindo y Contreras, 2018).

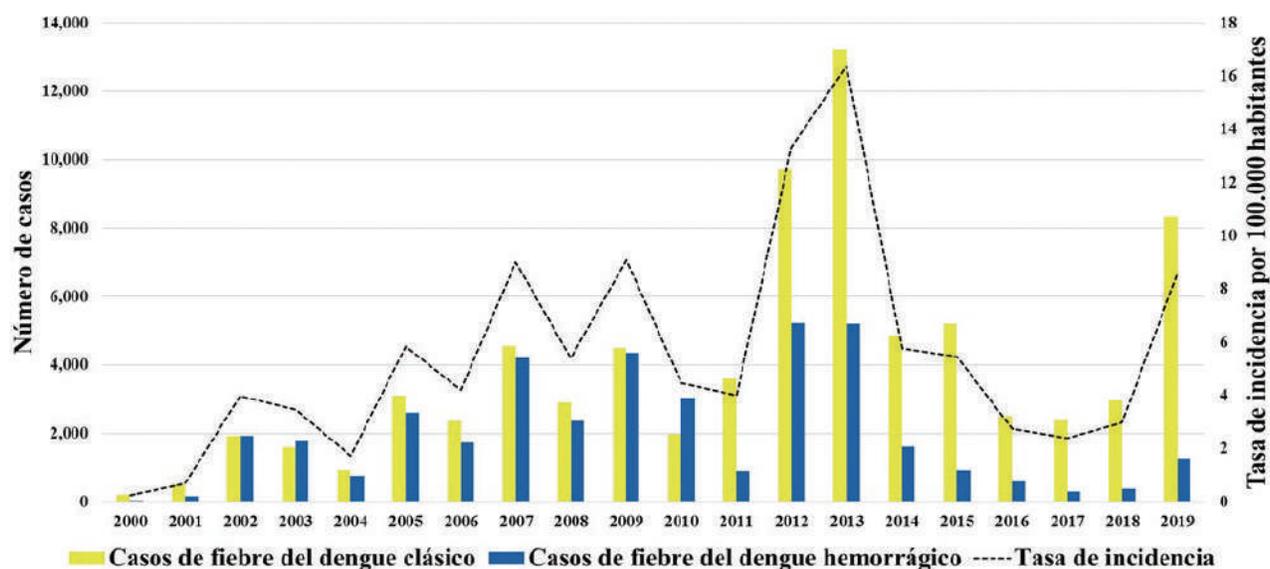
La distribución de la enfermedad del Dengue y el insecto vector, está determinada por una compleja dinámica de factores medioambientales y sociales en las últimas tres décadas: a) la globalización de los desplazamientos y del comercio, b) la urbanización no planificada y c) el impacto ambiental a través de la deforestación y el cambio climático, lo que transformo a las denominadas enfermedades tropicales, al quebrantar su determinismo geográfico, ya que a partir del siglo XXI las ETV se difundieron hacia latitudes más allá del Ecuador y los Trópicos, llegando incluso a ser epifocos severos más allá del paralelo de 30 grados (tanto en latitudes Norte y Sur) y hacia regiones de climas secos y desérticos de ciudades medias principalmente, ya que enfrentamos mayor plasticidad, adaptación y evolución de la microfauna (virus, bacterias, hongos e insectos; Galindo y Contreras, 2018). Entre los factores de riesgo se han propuesto la variabilidad climática, la circulación de los serotipos, la genética de las poblaciones virales y las características genéticas de la población. Relacionado con lo anterior, la presente investigación analiza el vector del dengue, con los egresos hospitalarios y la variabilidad climática, en particular con los periodos de sequía.

## Teoría

El dengue, es transmitida por el mosquito *Aedes aegypti* y en menor medida por *Aedes albopictus* (OPS,2022). El virus del dengue pertenece al género *Flavivirus*, de la familia *Flaviviridae* del grupo de los *Arbovirus* y está conformado por cuatro serotipos: DENV-1, DENV-2, DENV-3 y DENV-4, sin embargo, se agregó un quinto serotipo (DENV 5) anunciado en octubre de 2013, después de su aislamiento en 2007 en Malasia (Mustafa, et. al., 2014). La infección por un serotipo produce inmunidad permanente contra la reinfección. Sin embargo, una infección sucesiva con dos serotipos diferentes es un factor de riesgo para desarrollar las formas graves de la enfermedad (Arredondo et. al., 2020). Los síntomas se

presentan al cabo de un periodo de incubación de 4 a 10 días después de la picadura de un mosquito infectado y duran por lo común entre 2 y 7 días. La OMS (2022) clasifica el dengue en dos categorías principales: dengue (con o sin signos de alerta) y dengue hemorrágico o grave. En México, los primeros brotes de dengue se registraron en 1941, cuando se notificaron 6,955 casos en toda la república. Posteriormente se registraron pocos casos, hasta su desaparición en 1963, gracias a la campaña de erradicación del *Aedes* que mantuvo al dengue ausente durante 12 años. Sin embargo, en 1978 se reintrodujo en México vía Centroamérica a través de la frontera con Guatemala (Barba, 2014), donde aumentaron los casos a partir de 1980, lo que convirtió el dengue en uno de los problemas actuales más importantes de salud pública a nivel nacional (Torres et al., 2014). Posteriormente, en 1995 ocurre la primera epidemia de dengue hemorrágico. En la actualidad en México circulan los cuatro serotipos virales, el número de casos de reportes hospitalarios entre 2000 al 2019 de 116,776 personas, mientras que el número de muertes por dengue se ha mantenido por debajo de 1% con un total de 503 defunciones durante el mismo periodo. El 66% (77,331 personas) es dengue clásico o no grave y el 34% (39,445 personas) dengue hemorrágico o grave. La OMS coloca a México como el país que ocupa el quinto lugar de incidencia en América Latina (Ramírez-Zepeda et al., 2009; Mora-Covarrubias et al., 2010; OMS, 2022). Se reconocen 6 brotes fuertes en los últimos 19 años, el más grave entre y sin precedente histórico se da entre 2012 y 2013 con tasas de incidencia entre 13.3 y 16.3 personas por cada 100 mil habitantes (Figura 1).

**Figura 1. Casos confirmados de fiebre del dengue clásico y hemorrágico y tasa de incidencia anual en México 2000 - 2019**



En concordancia con lo anterior, es importante destacar que la condición de derechohabientes de los pacientes afectados por el dengue, corresponde hasta el año

de 2019, en su mayoría al Seguro Popular con 46.30 % del total de casos, el segundo lugar se encuentra "No especificado" con 40.8 %, en tercer lugar, se presenta en la categoría de "Se Ignora" con 10.7 %, finalmente el 2.3% de casos están afiliados al Instituto de Seguridad y Servicios Sociales de los Trabajadores del Estado (ISSSTE), Gobierno Estatal, Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA), Instituto Mexicano del Seguro Social (IMSS), Seguro Privado, Petróleos Mexicanos (PEMEX), Secretaría de Marina (SEMAR) y Programa de Educación, Salud y Alimentación (PROSPERA). Para ese mismo año de 2019, año pre COVID-19 termino con una tasa de prevalencia de 8.5 personas por cada mil habitantes, sin embargo empezaron las alertas y notificaciones de los casos de las enfermedades sobrepuestas y la nueva sindémia (dos epidemias) entre COVID-19 y Dengue, Jalisco era señalado como un estado sindémico, ya que tuvo una velocidad de aparición del 64.11% de casos confirmados por Virus del Dengue, y a la vez se reportaban múltiples contagios por COVID-19, observándose casos del coloquialmente bautizado como COVIDengue, que hacía referencia a pacientes que cursaban con las dos infecciones virales (UAP, 2021). De todos los factores ambientales, el que ejerce un efecto mayor sobre el desarrollo de los insecto-vector del Dengue es, probablemente, la temperatura. Ello es debido principalmente a su importante incidencia sobre los procesos bioquímicos, al ser el vector un organismo poiquiloterma, es decir, adopta la temperatura del ambiente (Pataki, 1972; Wallner, W.E. 1987). El incremento en la temperatura también favorece al aumento en las densidades de población de insectos. A mayor temperatura el ciclo de vida de los artrópodos se acorta, por lo que se pueden presentar mayor número de generaciones en un solo año. Por otra parte, los modelos de circulación general pueden ser de utilidad para determinar la presencia, establecimiento y dispersión de vectores, a fin de simular escenarios futuros de las epidemias, aunque la mayoría de los modelos de circulación general operan en grandes escalas de resolución. Sin embargo, persiste el reto de considerar la variabilidad del clima en la epidemiología del Dengue (Legreve y Duveiller, 2010). No obstante, recientemente se ha comenzado a relacionar los cambios periódicos y extraordinarios del clima, para demostrar como el modelo global de predicción del fenómeno de El Niño coincide con un mayor número de enfermos por Dengue.

## Metodología

Los escenarios de dengue se analizaron mediante bases de datos de egresos hospitalarios disponibles públicamente de la Secretaría de Salud, los cuales permiten conocer la demanda de atención de los servicios de hospitalización, así también brindan apoyo para planear y tomar decisiones en temas de salud. Los egresos hospitalarios proporcionan información sobre hospitalización, afecciones principales, sexo y edad del paciente, días de estancia en el hospital, entre otras. Esta información fue reportada por las unidades médicas de la Secretaría de Salud, en un periodo de 19 años (2000 - 2019). La información de egresos hospitalarios de fiebre del dengue clásico y hemorrágico, se obtuvieron de la plataforma del Subsistema Automatizado de Egresos Hospitalarios-SAEH

de la Secretaría de Salud, con un total de 114,681 egresos hospitalarios de fiebre del dengue (66.2 % corresponden a fiebre del dengue clásico y el 33.8 % a fiebre del dengue hemorrágico). También, se utilizó la información del CLUES la cual contiene la Clave Única de Establecimientos de Salud, en las cuales se relacionaron con los egresos hospitalarios a través de sus identificadores únicos y coordenadas geográficas, lo anterior para construir bases de datos epidemiológicas que se pudieran representar en el software SIG. Para el cálculo de los indicadores de morbilidad de dengue, en términos de prevalencias, se utilizó la prevalencia puntual, es decir; el número total de casos existentes sobre la población total multiplicado por  $10^n$ , la tasa de prevalencia se interpreta como el riesgo de que se padezca la enfermedad y es útil para valorar la necesidad sanitaria, planificar los servicios de salud y estimar necesidades asistenciales. El indicador de incidencia por su parte expresa la incidencia de casos nuevos (casos incidentes) de dengue por 100.000 habitantes (formula clásica utilizada en todos los libros de epidemiología); su cálculo expresa la ocurrencia de la enfermedad entre la población en relación con unidades de tiempo-persona, por lo tanto, mide la velocidad de ocurrencia de la enfermedad. En el caso de los indicadores de mortalidad (letalidad) de la enfermedad de fiebre del dengue hemorrágico, se utilizó el número de muertes de la enfermedad en el periodo 2000 - 2019 dividido entre el número de casos diagnosticados de la enfermedad en el mismo periodo multiplicado por 100, cuyo resultado indica la tasa de letalidad y se interpreta como el porcentaje de muertes de una causa específica con respecto al total de enfermos por esta causa.

Para la representación espacial sobre la influencia del clima en el establecimiento y expansión del dengue, se trabajó con la cartografía de climas de México desarrollada por el INEGI. La imagen fue georeferenciada utilizando el software "ArcMap 10.2", a continuación, por medio de la herramienta "EDITOR" se llevó a cabo un "corte" del archivo shapefile de estados del "Marco Geoestadístico" versión 5.0, utilizando como base los límites de cada región climática. A continuación, se relacionaron las regiones climáticas con los egresos hospitalarios por dengue y dengue hemorrágico, para esto se empleó la herramienta "Spatial Join" del mismo software. Una vez que se identificó la relación espacial de los egresos hospitalarios con el clima, se estimó el porcentaje con respecto al total de casos de dengue. Posteriormente, se representó de forma gráfica las características de cada tipo de clima en relación con su temperatura y precipitación media anual de acuerdo con el sistema de clasificación climática de Köppen modificado por Enriqueta García (1988). Además, se sobrepusieron los puntos que representan el porcentaje de egresos en cada tipo de clima (ver mapa 1).

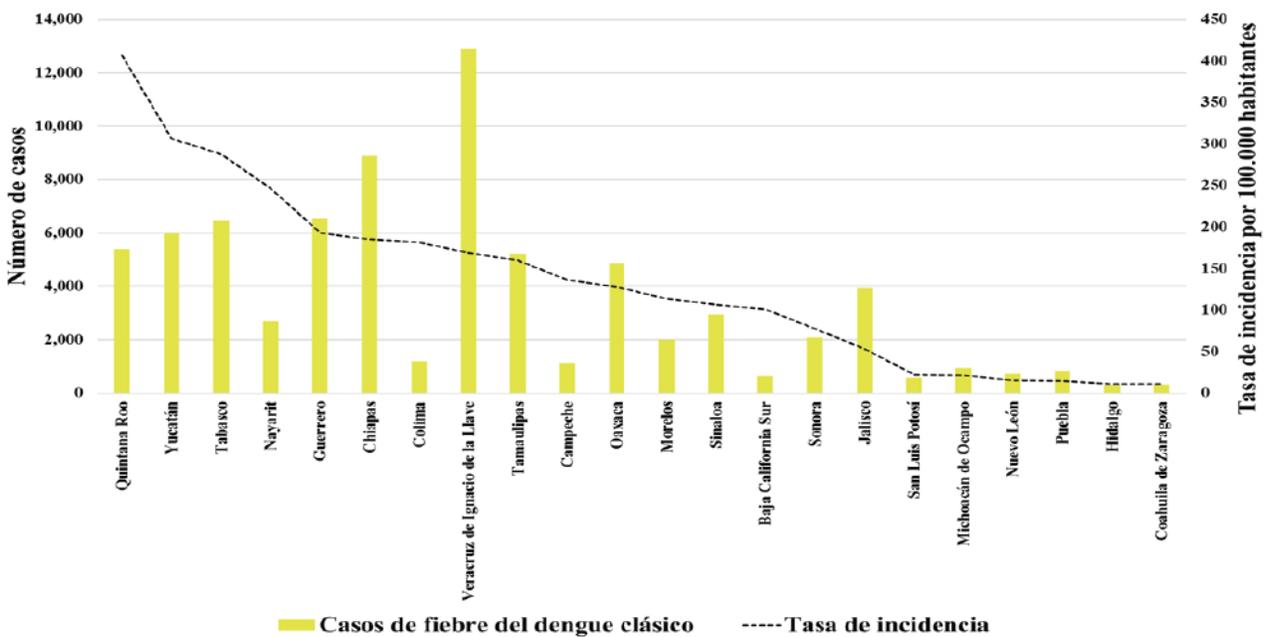
## Resultados y discusiones

En México, la fiebre del dengue clásico y hemorrágico le costó la vida a más de 350 personas a lo largo de 20 años, donde el sexo femenino mantuvo un porcentaje similar

que el sexo masculino con 50.71 y 49.29% de muertes respectivamente. El estado de Chiapas fue la entidad que más defunciones registro, siendo precisamente las mujeres las de mayor porcentaje. De forma contraria, donde las defunciones afectaron principalmente al sexo masculino fueron: Guerrero (58.53%) y Veracruz (76.78%). En el 2018 se registraron 121 defunciones, siendo considerado uno de los años con mayores muertes en el país por esta enfermedad. En este sentido, la distribución de muertes por dengue se localizó en 22 entidades del país, donde 9 estados se destacaron por mantener más de 13 defunciones, mientras que 13 estados se situaron por debajo de 8 muertes por dengue clásico y hemorrágico. A nivel estatal en el periodo 2000 - 2019, Veracruz fue la entidad federativa que ocupó el primer lugar a nivel nacional en acumulación de casos de fiebre del dengue clásico y hemorrágico con 22,472 (19.2 %), seguido de Chiapas, Guerrero, Oaxaca y Tamaulipas, cuyas entidades representaron más del 52 % de casos totales en el país. Las entidades federativas que reportaron nuevos casos de dengue a partir de 2015 fueron Zacatecas, Baja California, Ciudad de México, Tlaxcala, Aguascalientes, Querétaro y Chihuahua con el 0.1 % de casos respectivamente (ver mapa 1).

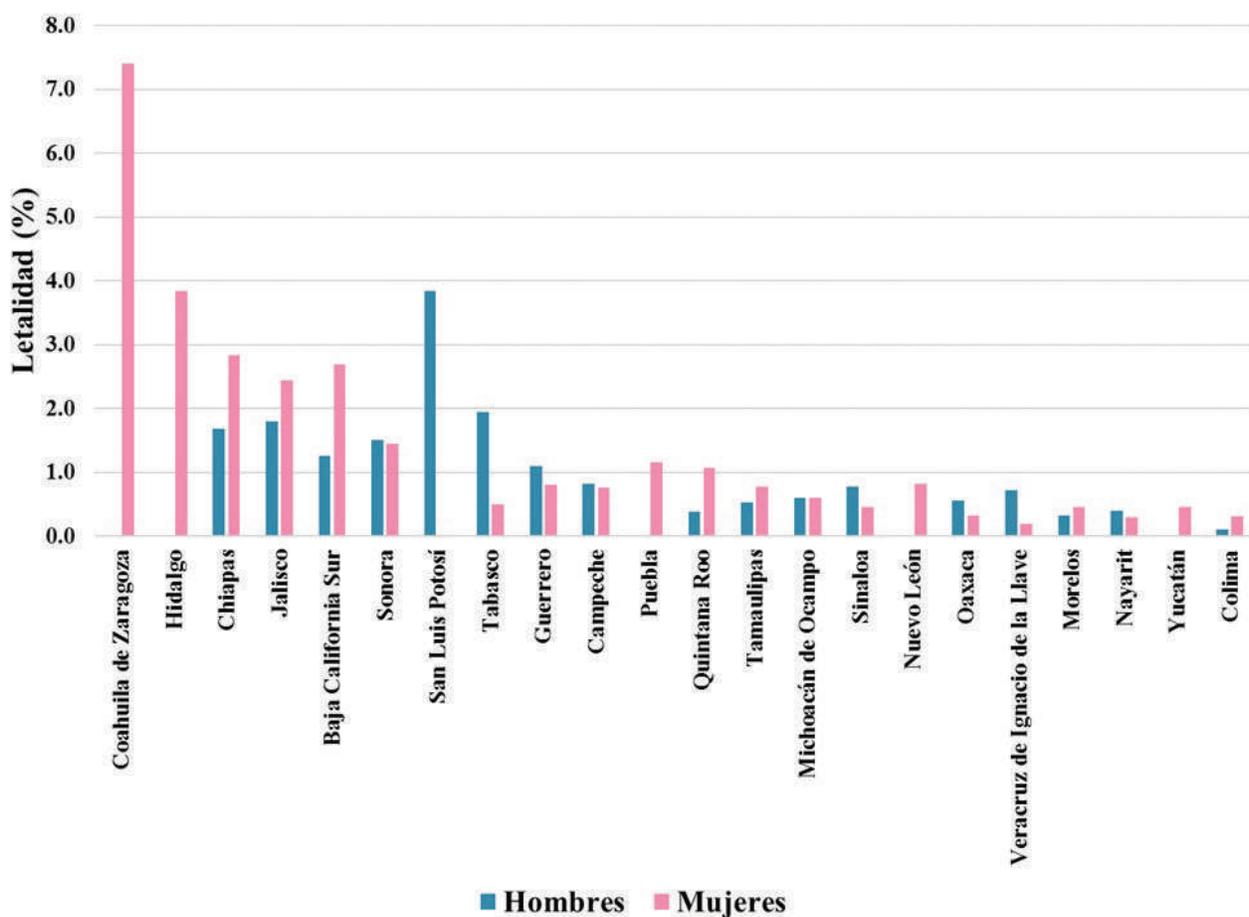
La incidencia de casos de fiebre del dengue clásico al cierre del periodo 2000-2019 (ver Figura 2) fue de 92.7 casos / 100.000 habitantes. A pesar de que el 16.6 % del total de los casos acumulados de dengue se presentaron en Veracruz, en él se encontraron un 42 % por debajo en incidencia de casos de dengue clásico, en comparación con Quintana Roo (407 casos / 100.000 habitantes), Yucatán (306 casos / 100.000 habitantes) y Tabasco (288 casos / 100.000 habitantes).

**Figura 2. Tasa de incidencia de casos de fiebre del dengue clásico en México por entidad federativa 2000-2019.**



Las 5 entidades federativas que presentaron una mayor tasa de letalidad por fiebre del dengue hemorrágico fueron Coahuila de Zaragoza, Hidalgo, Chiapas, Baja California Sur y Jalisco. En las dos primeras entidades el 100% de las defunciones fueron mujeres, sobre todo por presentar otras enfermedades como obesidad, presión alta y embarazo (OMS, 2022), mientras que en caso de San Luis Potosí, el 100% de las defunciones se presentaron en varones. Aguascalientes, Baja California, Chihuahua, Ciudad de México, durango, Guanajuato, Estado de México, Querétaro, Tlaxcala y Zacatecas son las únicas entidades que no presentaron muertes por la enfermedad (Figura 3).

**Figura 3. Tasa de letalidad de fiebre del dengue hemorrágico, 2000 - 2019.**



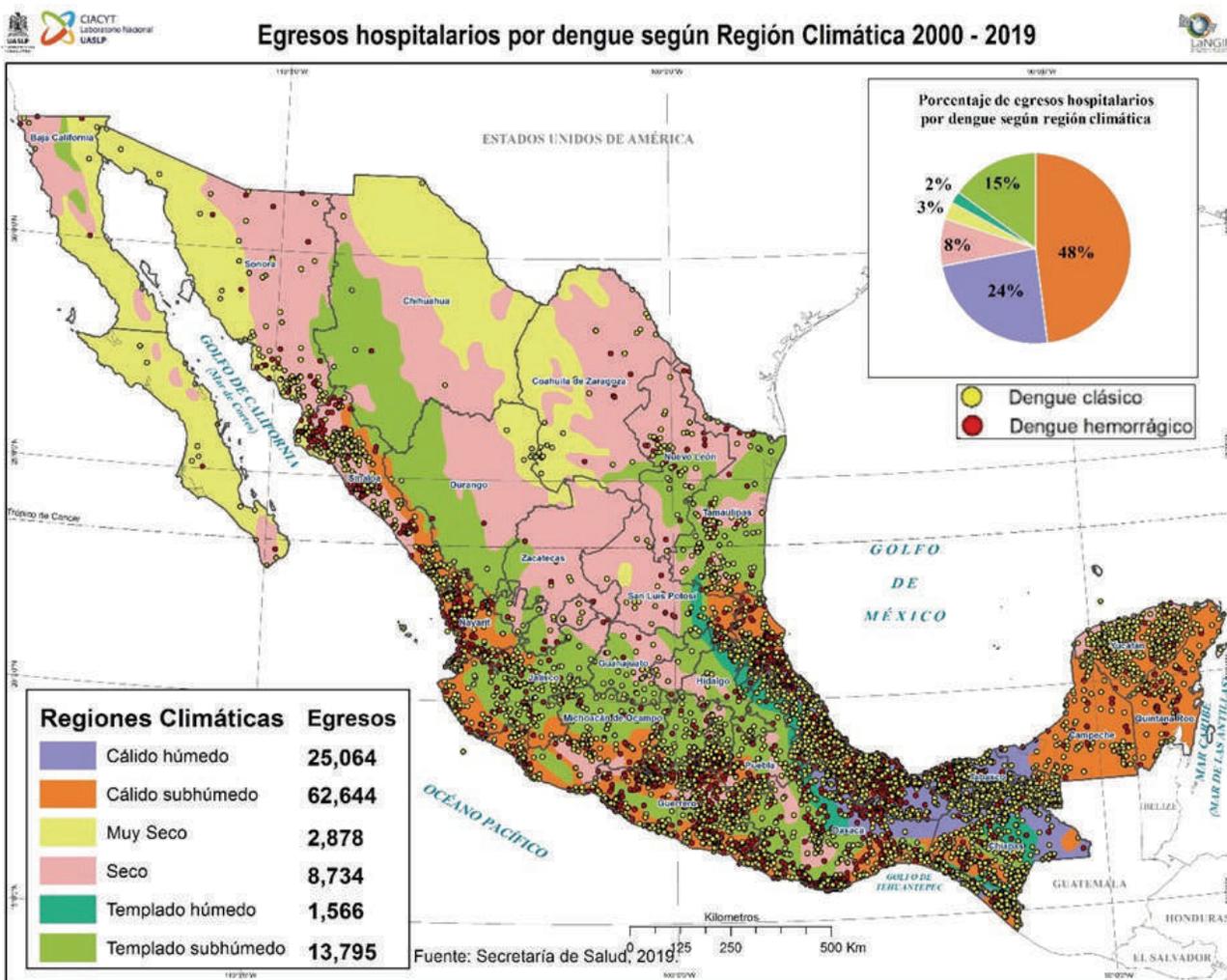
Como resultado de esta investigación, se pudieron establecer los principales factores relacionados con el clima, que influyen en la proliferación, distribución y transmisión de la enfermedad del dengue en México, desde el año 2000 hasta el 2019. El estudio muestra que los casos de dengue han ido en aumento, concentrándose principalmente en los climas cálidos, aunque a partir del año de 2005, la distribución de la enfermedad se ha expandido hacia el norte del territorio nacional, particularmente, en climas secos (Bs),

algo inusual históricamente. Lo anterior, puede ser explicado con base a la variabilidad en los regímenes de precipitación y temperatura, los cuales producen un cambio atípico, en el comportamiento de los climas en el país. Dentro del comportamiento mensual y su relación con el reporte de casos de dengue, octubre es el mes con mayor número de casos en promedio, mientras que enero es el mes con menor registro de casos, esto se puede asociar a las lluvias que propician una mayor humedad; es decir, al haber una mayor precipitación y una temperatura mayor, los casos de dengue aumentan su expansión territorial y abarcan más grupos de climas, mientras que cuando disminuyen las lluvias y la temperatura, los casos de dengue se concentran en los climas cálidos.

La región climática cálido subhúmedo y cálido húmeda fue el área, en donde se registraron la mayor cantidad de casos por dengue. Estas dos regiones climáticas, por sí solas concentraron más del 76.48% de los casos registrados en el periodo 2000-2019. Su distribución cubrió casi en su totalidad a la Península de Yucatán, las regiones cercanas al Golfo de México, principalmente el estado de Veracruz. Además de las zonas cercanas al Océano Pacífico desde el litoral del estado de Chiapas hasta el sur del estado de Sinaloa. Aunque en años más recientes, se han presentado abundantes casos en el centro-norte del país, desde Aguascalientes hasta Coahuila y Chihuahua (ver mapa 1 y Tabla 1).

**Tabla 1. Casos de dengue por clima 2000 a 2019**

Tipo de clima	Número de Casos	Casos (%)
Cálido subhúmedo	62,644	54.62
Cálido húmedo	25,064	21.86
Muy seco semicálido	7,279	6.35
Semifrío subhúmedo	3,693	3.22
Semiseco templado	3,482	3.04
Semiseco muy cálido	3,462	3.02
Seco cálido	2,577	2.25
Seco muy cálido	2,224	1.94
Muy seco templado	2,137	1.86
Seco templado	875	0.76
Seco semicálido	385	0.34
Templado subhúmedo	342	0.30
Semicálido húmedo	179	0.16
Semicálido subhúmedo	146	0.13
Semiseco cálido	98	0.09
Templado húmedo	71	0.06
Semiseco semicálido	14	0.01
Muy seco cálido	9	0.01
Total	114,681	100



Desde el año 2003, fecha en que se comenzó a publicar los resultados del Monitor de Sequía en México y hasta el 2019, se presentaron 114,681 casos de dengue en el país. En el periodo de 2003-2019, el 70% de los casos ocurrieron en áreas que no fueron afectadas por la sequía, mientras el 30% guardaba alguna relación con la sequía, esto es importante porque sugiere que a futuro el vector del dengue se puede establecer en regiones semiáridas. La relación con el cambio climático en México es que aumente gradualmente la superficie de climas semiárido y árido, con lo que el aumento de casos de dengue en climas secos demuestra que paulatinamente el vector del dengue se está adaptando a periodos de sequía más prolongados, constituyendo a futuro un problema de salud para la población urbana de la región centro-norte del país.

Finalmente, es difícil prever la manera en que cambio climático en México afectara la distribución regional del dengue, tentativamente se puede concluir, que los fenómenos derivados del calentamiento global, como sequías, ciclones, precipitaciones y temperaturas de mayor intensidad, favorecerán en un aumento en la incidencia e

incremento de la enfermedad en diferentes regiones del país, principalmente las zonas cálidas subhúmedas y en segundo lugar las semiáridas.

## Referencias

- Barba, J. (2014). Dengue. Problema que preocupa y ocupa a la salud pública. *Revista Latinoamericana de Patología Clínica Medicina de Laboratorio* 61(2), pp. 84-101.
- Galindo, MG., & Contreras, C. (2018). Geomedicina y tecnología satelital aplicada a la vigilancia en salud pública y control de enfermedades transmisibles por vector. En: Galindo, MG., & Contreras, C., *Geomedicina y la tecnología especial aplicada al caso de los vectores en salud humana*. México, UASLP (Ed), pp. 55-68.
- Galindo, MG., & Contreras, C. (2019). Geomedicina y tecnología satelital aplicada a la vigilancia epidemiológica en enfermedades transmitidas por vector (ETV). En CONCYTEQ (Ed), *Hacia el desarrollo espacial de México Primer encuentro académico del Fondo Sectorial de Investigación, Desarrollo Tecnológico e Innovación en Actividades Espaciales*. México, CONACYT-AEM 2017 1, 163-172.
- García, E. (1988). *Modificaciones al sistema de clasificación climático de Köppen*. Cuarta edición. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México, México, DF.
- Legrève, A., & Duveiller, E. (2010). Preventing potential diseases and pest epidemics under a changing climate. *Climate change and crop production*, 1, pp. 50-70. <https://doi.org/10.1079/9781845936334.0050>
- Mora-Covarrubias, A. D. L., Jiménez-Vega, F., & Treviño-Aguilar, S. M. (2010). Distribución geoespacial y detección del virus del dengue en mosquitos *Aedes (Stegomyia) aegypti* de Ciudad Juárez, Chihuahua, México. *Salud pública de México*, 52(2), pp. 127-133.
- Mustafa, MS., Rasotgi, V., Jain, S., & Gupta, V. (2015). Discovery of fifth serotype of dengue virus (DENV-5): A new public health dilemma in dengue control. *Medical Journal, Armed Forces India* 71(1), pp. 67-70. <https://doi.org/10.1016/j.mjafi.2014.09.011>
- OMS, (2022). Dengue y dengue grave. Organización Mundial de la Salud. Recuperado el 10 de diciembre 2022 de <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/dengue-and-severe>
- OPS, (2022). Dengue. Organización Panamericana de la salud. Recuperado el día 15 de diciembre 2022 de <https://www.paho.org/es/temas/dengue>
- Organización de la Salud, O. P. (2022). Síntesis de evidencia: Directrices para el diagnóstico y el tratamiento del dengue, el chikunguña y el zika en la Región de las Américas. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 46. Recuperado el día 15 de diciembre 2022 de <https://www.paho.org/es/temas/dengue>
- Pataki, E. (1972). *Conceptos fundamentales de ecología*. Ed. CENIC (La Habana).
- Ramírez-Zepeda, M. G., Velasco-Mondragón, H. E., Ramos, C., Peñuelas, J. E., Maradiaga-Ceceña, M. A., Murillo-Llanes, J., ... & Chaín-Castro, R. (2009). Caracterización clínica

- y epidemiológica de los casos de dengue: experiencia del Hospital General de Culiacán, Sinaloa, México. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 25(1), pp. 16-23.
- Torres, I., Cortés, D., & Becker, I. (2014). Dengue en México: análisis en dos décadas. *Gaceta Médica de México* 150, pp. 122-127
- Wallner, W. E. (1987). Factors affecting insect population dynamics: differences between outbreak and non-outbreak species. *Annual review of entomology*, 32(1),



# 10

## **Emisiones de metano, sequía y cambio climático en la región Huasteca Potosina: innovación en la gestión del riesgo a partir SENTINEL-5P y modelado espacial**

*Galindo Mendoza María Guadalupe*

Laboratorio Nacional de Geoprocusamiento de Información Fitosanitaria-CIACyT- Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP-México, ggm@uaslp.mx, ORCID: 0000-0001-8775-5120

*Contreras Servín Carlos*

Laboratorio Nacional de Geoprocusamiento de Información Fitosanitaria-CIACyT- Universidad Autónoma de San Luis Potosí, SLP-México, coser@uaslp.mx, ORCID: 0000-0003-2221-1565

*Palacio Aponte Álvaro Gerardo*

Facultad de Ciencias Sociales y Humanidades- Lic. Geografía- Universidad Autónoma de San Luis Potosí. SLP-México, ORCID: 0000-0002-5020-2482

Citar este capítulo: Galindo Mendoza, G., Contreras Servín, C. y Palacio Aponte, G. A. (2024). Emisiones de metano, sequía y cambio climático en la región Huasteca Potosina: innovación en la gestión del riesgo a partir SENTINEL-5P y modelado espacial. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales Hernández, J. C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim, México. Pp: 173 - 187.

### **Resumen:**

Actualmente, la Huasteca Potosina presenta una alta vulnerabilidad a la sequía. En esta región, la precipitación cayó un 25% por debajo de la precipitación anual correspondiente a la moda ajustada entre 1961 al 2000. Asimismo, el modelo termodinámico del clima, aplicado al Río Pánuco, en donde se ubica esta región, se calcula que en el periodo 2025-2050, la temperatura promedio anual de la zona podría aumentar en 3°C; en tanto la precipitación podría disminuir, particularmente en la zona de Tamúin-Ébano, de los 896 mm a los 654.1 mm en promedio. Uno de los gases precursores de calentamiento global en la zona, probablemente es el metano gastroentérico, ya que en esta región se concentran más de 800 mil cabezas de ganado bovino, lo que posiciona al estado potosino en tercer lugar nacional de producción de carne. De aquí la importancia de evidenciar la correlación entre la emisión de gases efecto invernadero, aumentos de temperatura en superficie y suelo (efecto invernadero) y las sequías como modelo de gestión climática. Las emisiones de metano están acelerando el cambio climático de esta región incluido

el sur de Tamaulipas y Norte de Veracruz, lo que puede provocar que está gran zona con más de 700 mil habitantes (58% población indígena) cambie de un clima  $AW_0$  a un clima  $BS_1$  hacia el 2030. Para determinar la cantidad de emisiones, se propone que las imágenes de satélite SENTINEL-5P sean un instrumento de monitoreo y medición importante para determinar la normativa  $CH_4$  a fin de integrar un inventario transparente, comparable, consistente, exhaustivo y exacto. Tener datos sobre las emisiones permite realizar mejores cálculos del forzante antropogénico y sus tendencias, los cuales son necesarios para proyectar de manera confiable los efectos climáticos de medio a largo plazo, así como para determinar estrategias viables de mitigación.

Palabras clave: [Gestión del riesgo climático](#), [Ganadería](#), [Inventario de Emisiones](#), [Sensores remotos](#).

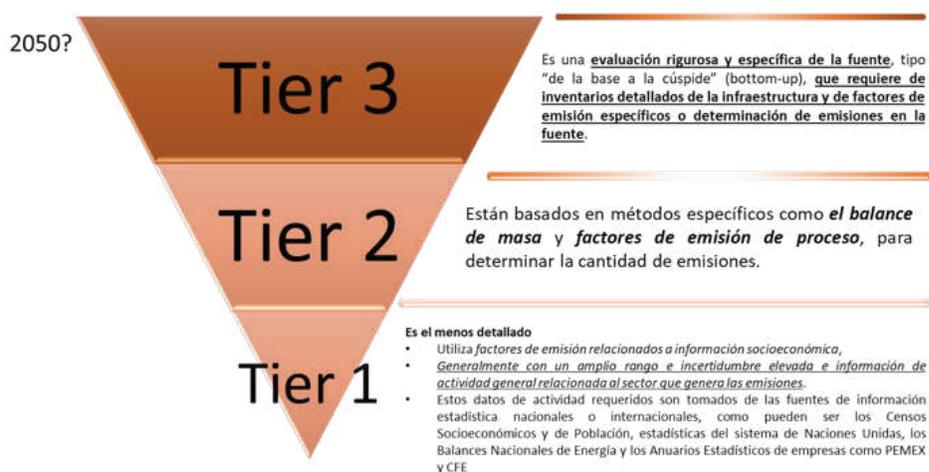
Línea temática: Línea temática 2. Diagnóstico y análisis de procesos.

## Introducción

La FAO (2017) estima que el crecimiento de la población humana mundial llegará a 9,700 millones en el 2050, con el doble de poder adquisitivo para el consumo de carne y derivados lácteos. Por lo que los sistemas agrícolas deben ser más eficientes y sustentables con el medio ambiente, permitiendo reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), garantizando el bienestar del ecosistema y de las poblaciones rurales. Debido al aumento progresivo de la población mundial y la demanda de proteínas de origen animal para consumo humano, existe una elevada preocupación por el papel que desempeñan los rumiantes domésticos en el calentamiento global, principalmente por la producción de GEI, pues en forma directa contribuyen con la emisión de metano ( $CH_4$ ) y dióxido de carbono ( $CO_2$ ) a partir de la fermentación ruminal y de óxido nitroso ( $N_2O$ ) por la degradación de sus heces y orina en el ambiente (Eckard et al, 2010; FAO, 2018); y en forma indirecta a través de las actividades que involucran la producción de forrajes y la conversión de bosques en pasturas para su alimentación (Sejian, 2015; Vázquez et. al. 2020). De acuerdo con Steinfeld et. al. (2006) el sector ganadero emite 7.1 Gt de  $CO_2$  aproximadamente, esto es el 18% de la emisión antropogénica global de GEI. Entre los GEI que emite el ganado, el metano juega un papel muy importante ya que lo producen en grandes volúmenes, y es 28 veces más potente que el  $CO_2$  para contribuir al efecto invernadero. Por otro lado, el metano, tiene una vida media de 9 a 15 años en la atmósfera (Eckard et al., 2010), periodo relativamente corto en comparación con otros GEI. En este contexto, los resultados de las acciones y políticas de mitigación del cambio climático, en particular para la reducción de la emisión de metano por fermentación entérica del ganado bovino, se apreciarían en el corto-mediano plazo en comparación con otros GEI en donde se tendría que esperar decenas sino cientos de años antes de observar un efecto. De aquí la importancia de su monitoreo en tiempo real, para implementar procesos de

adaptación y mitigación en aquellas zonas de alerta ambiental que evidencien procesos de cambio climático acelerado. En México los avances en la estimación de los factores de emisión y los inventarios han sido limitados sobre todo en zonas rurales. Las mediciones de la concentración del CH<sub>4</sub> se realizan de acuerdo a su reducción en la atmósfera y por ello es que no existe normativa aplicable para las emisiones, resultado de los inventarios oficiales de emisiones Tier 1, que son cuestionables debido a su baja precisión ya que sub-estima o sobre-estima las emisiones, porque no toman en cuenta la diversidad de climas, los diferentes sistemas de producción ganadera, diversidad de alimentación y de razas, así como el fin zootécnico para determinar la cantidad de emisiones (Vázquez, et. al., 2020). A partir del inicio de este siglo, las metodologías recomendadas por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) para realizar la estimación de las emisiones (Manual de Referencia de las Directrices; IPPC, 2007), las ha clasificado en tres niveles -Tiers- a las metodologías de estimación de emisiones, en función de su exactitud e información requerida (figura 1). El Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático desde 1996 hace la recomendación de tener juntos los inventarios de cambios de uso de suelo y actividades agropecuarias y según las guías de buenas prácticas 2000 a 2003 con la categoría clave de emisiones-remociones debe aplicar el Tiers 2 y 3. En la actualidad, la mayoría de los estudios en ganadería y cambio climático en América Latina están enfocados en la cuantificación de los volúmenes de la emisión de CH<sub>4</sub>, la determinación de los factores de emisión y el cálculo de los inventarios nacionales; pocos estudios se enfocan en el desarrollo de estrategias de mitigación (Benaouda et al., 2017). Para el año 2017, México se encontró dentro de los 10 países con mayor producción de GEI, con una contribución equivalente al 1.68% de las emisiones globales (Sauniois M. et al., 2020). Recientemente, se publicó el Primer Inventario Nacional Tier 2 de emisiones de metano por fermentación entérica del ganado bovino de México, registrando 2039.21 ± 205.5 Gg de CH<sub>4</sub> al año para una población aproximada de 31.8 millones de cabezas, (Castelán-Ortega et al., 2019).

**Figura 1. Inventarios de emisiones según tipo de Tier. LaNGIF-UASLP (2020).**



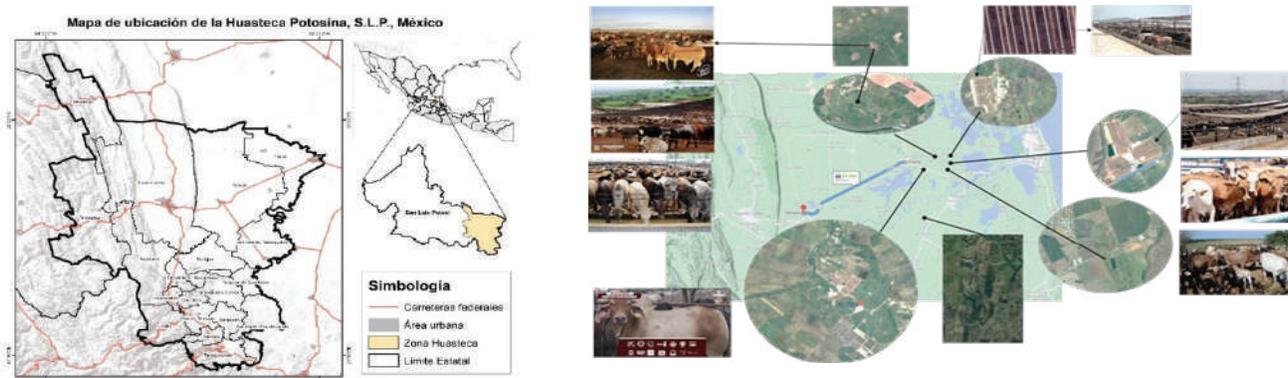
Sin embargo, a pesar de los adelantos en medición, el problema de emisiones de metano no se *espacializa* no se *cartografían* las emisiones GEI, esto es, siguen siendo factores de emisión sin georreferencia que no definen en forma puntual las fuentes de emisión. Es hasta inicios del siglo XXI cuando se conforman los consorcios de agencias espaciales más importantes para el monitoreo específico de los GEI y partículas suspendidas en la troposfera terrestre como gases traza, incluido el vapor de agua y partículas como aerosoles, nubes, humo y polvo. El satélite AURA-OMI de la NASA (lanzado en 2014), da los primeros mapas de riesgo a exposición de metano (Tian, et.al., 2022; Wang, et.al., 2019). Aura mide trazas de gases en la atmósfera mediante la detección de sus firmas espectrales únicas, el *Microwave Limb Sounder* (MLS) que capta las emisiones débiles de microondas de las moléculas que giran y vibran. El *High Resolution Dynamics Limb Sounder* (HIRDLS) es el espectrómetro de emisión troposférica (TES) que capta las emisiones térmicas infrarrojas, debidas a vibraciones y rotaciones moleculares. El instrumento de monitoreo de ozono (OMI) detecta la absorción molecular de la luz solar retrodispersada en las longitudes de onda visible y ultravioleta. Su contraparte la ESA (Agencia Especial Europea) lanzó en 2017, las pléyades SENTINEL a través del programa Copernicus en específico Sentinel-5P (S5P) el único satélite que proporciona mediciones de metano diariamente y a escala global. Este satélite lleva el instrumento TROPOMI que mapea una multitud de gases traza. Aparte del metano, estos incluyen dióxido de nitrógeno, ozono, formaldehído, dióxido de azufre, monóxido de carbono y aerosoles, todos los cuales afectan el aire que respiramos y, por lo tanto, nuestra salud y nuestro clima. Con un ancho de franja de 2,600 km, el satélite mapea todo el planeta todos los días (Ayasse, et.al., 2019) para detectar grandes columnas de metano. La misión llena el vacío en la continuidad entre SCIAMACHY (Espectrómetro de Absorción de Imágenes de Barrido para Cartografía Atmosférica) a bordo de Envisat (Buchwitz, et. al., 2018). Es por esto, que se propone que las imágenes de satélite S5P, TROPOMI, para tener información de superficie (ya que no se cuenta con aparatos que midan emisiones de metanos en tierra) en contraste con información de temperatura de suelo del satélite MODIS Terra y la información del monitor a la sequía, al aplicar procesos de modelado espacial, se pueden determinar el grado de correlación entre sequías y emisiones de metano (Lui, et. al. 2021) objetivo de esta investigación. Esto es una propuesta tecnológica que sirva como base como un instrumento de medición importante para determinar niveles máximos y mínimos permitidos en el caso de la ganadería tanto intensiva como extensiva, y aporte a la iniciativa de ley y normativa del CH<sub>4</sub>, a fin de integrar un inventario transparente, comparable, consistente, exhaustivo y exacto, que permita a México informar sobre sus emisiones a la Conferencia de las Partes y a la Convención Marco de Cambio Climático, así como generar, el protocolo que permita desarrollar e instrumentar programas y políticas eficaces de investigación, mitigación y adaptación frente al cambio climático. Cubrir el ODS Acción por el clima Objetivo 13: Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos. No podemos actuar o proponer, si no hay normativa. Desde el punto de vista científico, tener datos sobre las emisiones permite realizar mejores

cálculos del forzante antropogénico y sus tendencias, los cuales son necesarios para proyectar de manera confiable los efectos climáticos de medio a largo plazo, así como para determinar estrategias viables de mitigación. Políticamente hablando, los datos de emisiones con menor incertidumbre proporcionan una base de conocimiento sólido a las discusiones sobre el papel del sector agropecuario en el establecimiento de objetivos para un desarrollo rural sustentable, permitiéndole acceder a los beneficios de los fondos internacionales para adaptación y mitigación al cambio climático

## Área de estudio

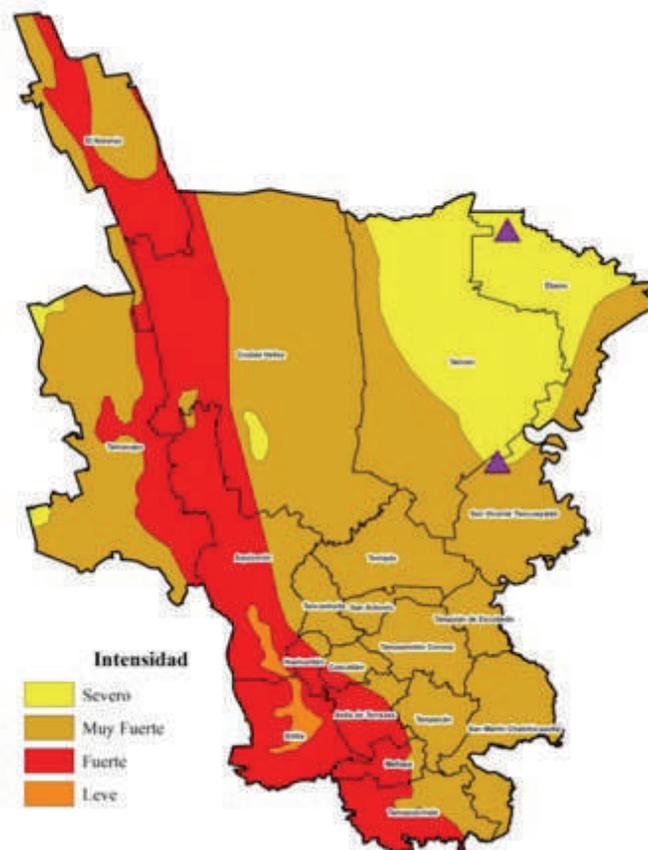
La Huasteca Potosina es una de las cuatro regiones geográficas en las que se divide el estado (figura 2). Se ubica hacia la planicie costera del golfo, colindando con Tamaulipas al Norte, y Veracruz e Hidalgo hacia el Sur (cuenca baja del Rio Panuco). San Luis Potosí cuenta con 2.2 millones de hectáreas dedicadas a la actividad pecuaria además de un registro de 49 mil 209 unidades de producción, destacando 1.2 millones de cabezas de ganado bovino, así como 430 mil caprinos, 340 mil ovinos. 800 mil cabezas de ganado (el 66%) se concentran en tres municipios huastecos Tamuín, Ébano y San Martín Tancuayalab. Al primer semestre del 2023 San Luis Potosí ocupa el tercer lugar en producción de carne de bovino con 58 mil 314 toneladas (Gobierno de SLP, 2020). Los pastizales naturales con los que contaba la Huasteca Potosina desaparecieron al implantarse el proyecto Pujal Coy en el decenio de los setenta (1973) dando paso a grandes procesos de deforestación dónde se perdió el 75% de las selvas y bosques de la región (Reyes, et. al. 2004) para implementar el sistema de ganadería intensiva y sostener con crecimiento constante a más de 800 mil cabezas de ganado. Esto dio paso a las grandes praderas a partir de la introducción de pastizales resistentes a la sequía cómo el Bermuda Tifton 68 y Bermuda Gigante NK-37 que son híbridos de origen estadounidense. Diversidad de malezas, un 43% resistentes a glifosato como el polocote (*Heliantus annuus* L.), hierba amargosa (*Parthenium hysterophorus*), trompillo (*Solanum elaeagnifolium*. Cav.) y zacate Jonhson (Hernández y Cuellar, 2007).

**Figura 2. Región Huasteca Potosina. Ubicación y caracterización de la región ganadera en la planicie costera del Golfo de México**



Por otro lado, se extiende hacia la parte centro-oriental la zona de plantaciones forrajeras como sorgo y soja y hacia el occidente, la zona intermontana de la gran región cañera potosina. Dando paso al corredor de agrocidades desde Ciudad Valles, Tamuín, Ébano y San Vicente Tancuayalab, también conocido como agrocorredor potosino. Una zona considerada dentro de los escenarios de cambio climático que ha pasado de un clima  $Aw_0$  a un clima  $BS_1$ , resultado del modelo termodinámico del clima MTC (Adem et al. 2000; Algará y Contreras, 2009; Figura 3). Lo que implica una alta vulnerabilidad a la sequía meteorológica ya que presenta un aumento de la temperatura histórica de 3° centígrados y una caída en la precipitación anual de 25% por debajo de la precipitación correspondiente a la moda ajustada entre 1961 al 2000 (Contreras; 2015 y Algará, et. al., 2009). De alto impacto local dónde la precipitación ha disminuido de 896mm en promedio a los 654.1mm (Maderey y Jimenez; 2005. A la par, por el incremento de la superficie ganadera y la quema de biomasa (pastizales y caña de azúcar) se presenta un incremento histórico en las emisiones de Metano ( $CH_4$ ) y Dióxido de Nitrógeno ( $NO_2$ ) así como Carbono Negro (BC; LaNGIF-UASLP, 2020).

**Figura 3. Índice de sequía con datos de 46 estaciones meteorológicas de 1960-2009 de la Huasteca Potosina.**



Fuente: Algará y Contreras (2009).

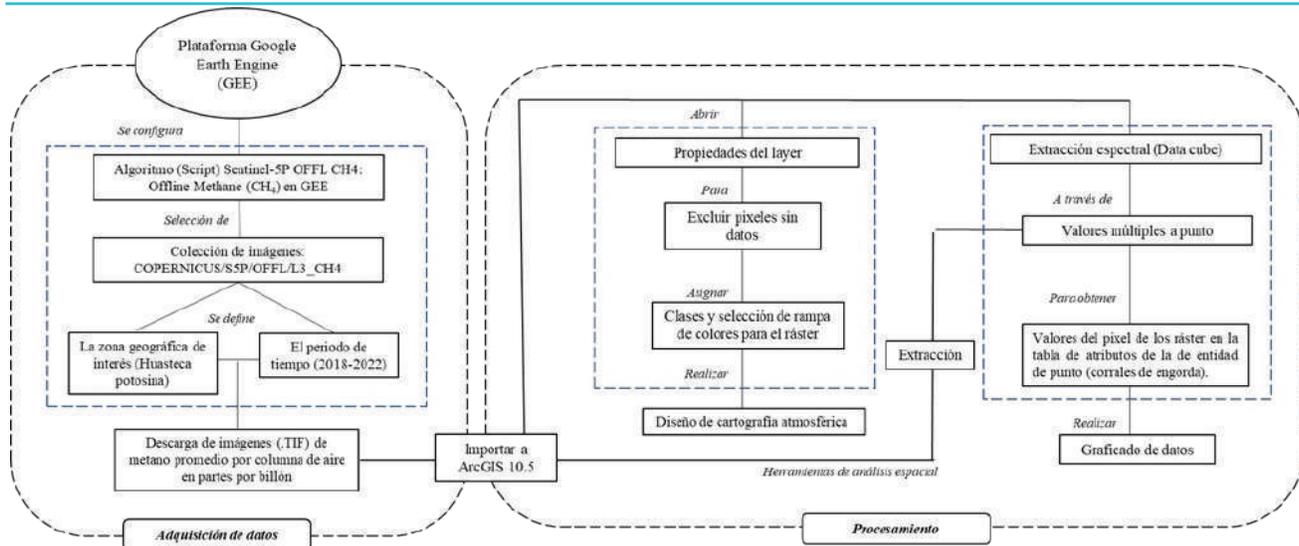
## Materiales y metodos

Se identificaron fuentes de información clasificadas en dos categorías: (a) datos geográficos, que se refieren a superficies derivadas de datos cartográficos de índices de sequía meteorológica y (b) datos estadísticos en formato tabular. Los datos tabulares de superficie agrícola se obtuvieron a partir del Sistema de Información Agroalimentaria de Consulta (SIAP) periodo 2018-2021. Se elaboró el inventario de emisiones Tier 1 según la metodología de la EPA en el AP-42 capítulo 14.4 (EPA,1996) durante la elaboración del reporte se realizó un estimado del número de cabezas con las toneladas producidas de carne publicadas por el SIAP (2018-2021) y el peso promedio de cada especie, para tener referencia de medición (aunque no son las mismas unidades), y empezar un estudio comparativo con los resultados obtenidos de la imagen de satélite por columna de metano emitida. Este es otro procedimiento en el que se debe trabajar para crear el modelo de equivalencias, sin embargo, esto será en la segunda etapa del proyecto de investigación. La propuesta metodológica consta de tres procesos: a) descarga y procesamiento de imágenes de satélite, b) extracción espectral puntual en **R** y c) generación de biblioteca espectral y cuantificación por columna de emisión (figura 4).

## Adquisición de datos satelitales

Las imágenes fueron descargadas de la plataforma de Google Earth Engine utilizando el editor de código (JavaScript; <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-Methane-retrieval.pdf>); se utilizaron 126 imágenes de satélite de Sentinel-5P de promedio mensual libre de nubes de la Región Huasteca Potosina. Las imágenes descargadas proporcionan datos en alta resolución espacial de las concentraciones y en las unidades que se mide la columna de metano, por lo que no es necesario aplicar algún tipo de ajuste. El proceso de las imágenes para realizar los mapas de metano fue a través del software ArcGIS 10.2, en el cual se cargaron las imágenes (formato TIF) y se configuró la gama de colores de acuerdo con la plataforma oficial de descarga. El instrumento presenta una resolución de 1 kilómetro (1,100 mts.; desde agosto de 2019) en la banda espectral SWIR en el nadir, proporcionando cobertura diaria mundial. El módulo SWIR de TROPOMI cubre el rango espectral de 4190 a 4340  $\text{cm}^{-1}$  (resolución espectral: 0,45  $\text{cm}^{-1}$ ), y se utiliza para medir la concentración de metano y monóxido de carbono en la atmósfera. Posteriormente, se hizo una extracción espectral (data cube) en **R** con el mismo número de imágenes satelitales, del área de máxima capacidad instalada de los corrales de engorda dónde su ubican las empresas de Praderas Huasteca y el grupo GUSI principalmente (Figura 4).

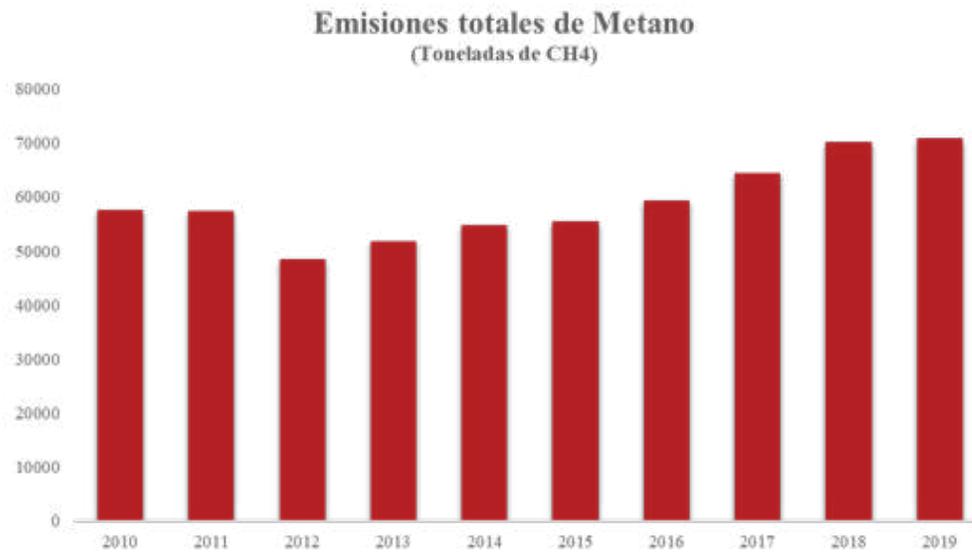
**Figura 4. Esquema metodológico de la descarga y procesado de imágenes SENTINEL 5P**



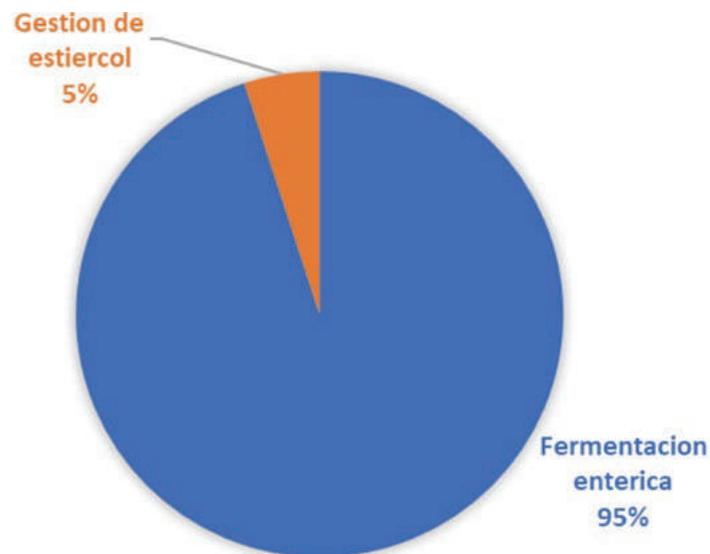
## Discusion y resultados

Los inventarios de emisiones Tiers 1 toman los dos sectores de ganadería, fermentación entérica (Proceso digestivo) Gestión de estiércol (Estiércol Producido). Cómo son estadísticos en base a cabezas de ganado se hacen a nivel nacional y estatales. Los municipales tienen más complicaciones porque se deben tener por agroempresa y difícilmente podemos acceder a este nivel con información abierta. Para el estado de San Luis Potosí, el 95% de las emisiones total de metano de ganado bovino para carne se da en la fermentación entérica. En valor porcentual, las emisiones por fermentación entérica promedio del periodo evaluado representan el 82.64%, siendo esta la mayor fuente de emisión derivada de la ganadería, seguido del N<sub>2</sub>O producido por la gestión de estiércol con 15.69%, y por último el CH<sub>4</sub> de la gestión de estiércol con 1.67% (Figura 5 y Figura 6). Hay un aumento de la actividad pecuaria en los últimos años para San Luis Potosí y no hay mecanismos de gestión ambiental que hayan logrado disminuir la producción en este sector, con lo cual estima que las emisiones seguirán en aumento. No se determina en dónde, que lugar o que municipio es el máximo o mínimo emisor y mucho menos podemos determinar periodos al largo de los meses. Impactos de meses secos o más lluviosos. En general, sin elementos para un modelado espacial para toma de decisiones.

**Figura 5. Emisiones totales de metano por año**



**Figura 6. Emisiones totales de metano en porcentaje en el año 2009**

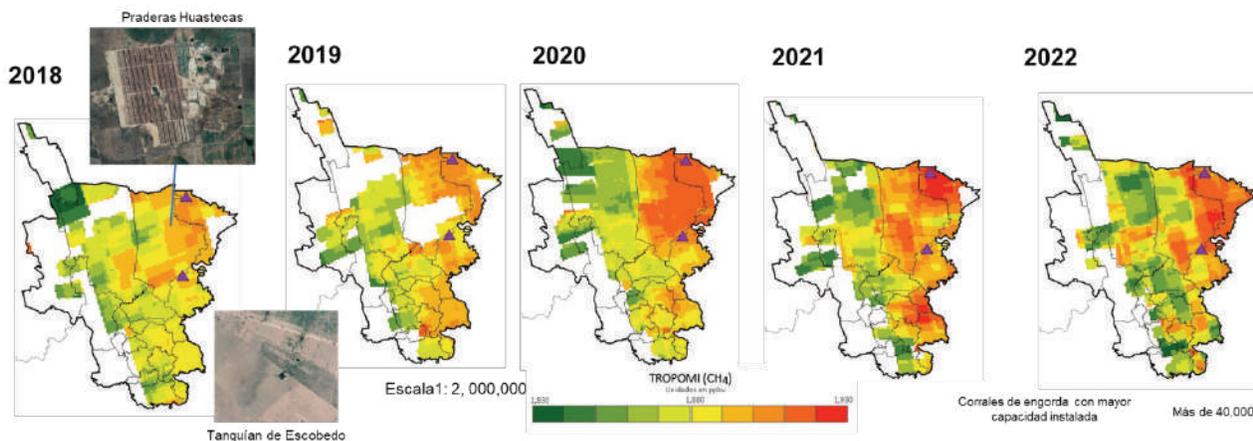


Fuente: Algará y Contreras (2009).

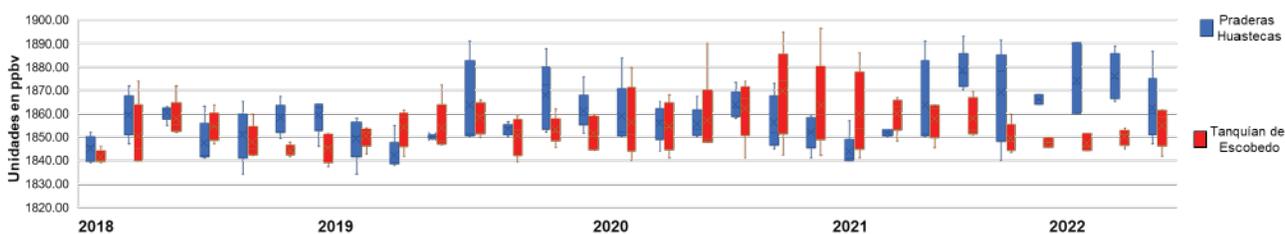
Observaciones a largo plazo, junto con modelos atmosféricos para estimar las emisiones de metano, son fundamentales para detectar tendencias a gran escala. Se requiere una cobertura de observación adecuada en el espacio y en el tiempo para restringir estimaciones de emisiones utilizando modelos inversos a escalas mundial, nacional o regional. Según los estudios aplicados (Ayasse, et.al., 2019; Wang, et.al., 2019; Tian, et.al., 2022), hay una índice correlación del 90 por ciento de certidumbre de cartografía atmosférica de las emisiones de metano en la columna de aire de Sentinel 5P (S5P) y el foco de emisión terrestre. La validación independiente por parte de los expertos Cal/Val del Mission Performance Center (MPC) y el equipo de Validación de Precursores (S5PVT) concluye que los datos de la columna total de metano son buenos en general para uso inmediato (<https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-Methane-retrieval.pdf>) ya que han sido validados con la plataforma acuerdo con (i) mediciones de referencia recopiladas de las redes terrestres globales TCCON y NDACC, y (ii) los productos de datos satelitales correspondientes de GOSAT (<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-5p/products-algorithms>).

Los resultados visuales de emisiones por columna de metano a través de S5P, nos muestran las zonas con mayor emisión que coinciden con los corrales de engorda de ganado estabulado en Tamuín y Ébano (zona de mayor sequía y evidencia de cambio climático; Figura 7). Empezamos las mediciones en 2018 ya que es cuando se tiene acceso público y libre al sensor S5P. El año 2020 se elevan en forma importante y que coinciden entre el cierre por COVID-19 y la época pos-pandemia dónde el incremento por producción de alimentos aumentó en términos generales en nuestro país. Esta subregión aumento un 2.5% ppbv (partes por billón). Paso de 1850ppvb a 1890ppbv en sólo 5 años (figuras 6 y 7). También nos permite observar nuevas zonas de exposición que no estaban contemplados en el análisis hacia la parte media y sur de la Huasteca Potosina, de ganadería extensiva pero que sus emisiones empiezan a ser elevadas como son: en primer lugar, Tanquián que aumento sus emisiones en un 2.7% en el 2021 (Figura 8), Tampamolón, Tampacan y San Martín Chalchicuatla, lo que está provocando que se eleven las temperaturas atmosféricas y entren a los municipios vulnerables a sequías y que compiten en el uso de suelo con acahuals y zonas productores de cítricos (naranja) y caña de azúcar. Sólo los meses de julio y agosto bajaron las emisiones de metano (Figura 9), sin embargo, debido a que la Región Huasteca Potosina ha enfrentado 3 años de sequía muy fuerte (Monitor a la sequía, SMN, 2020 a 2022), la poca precipitación que se presenta se evapora y no logra abastecer las necesidades ganaderas.

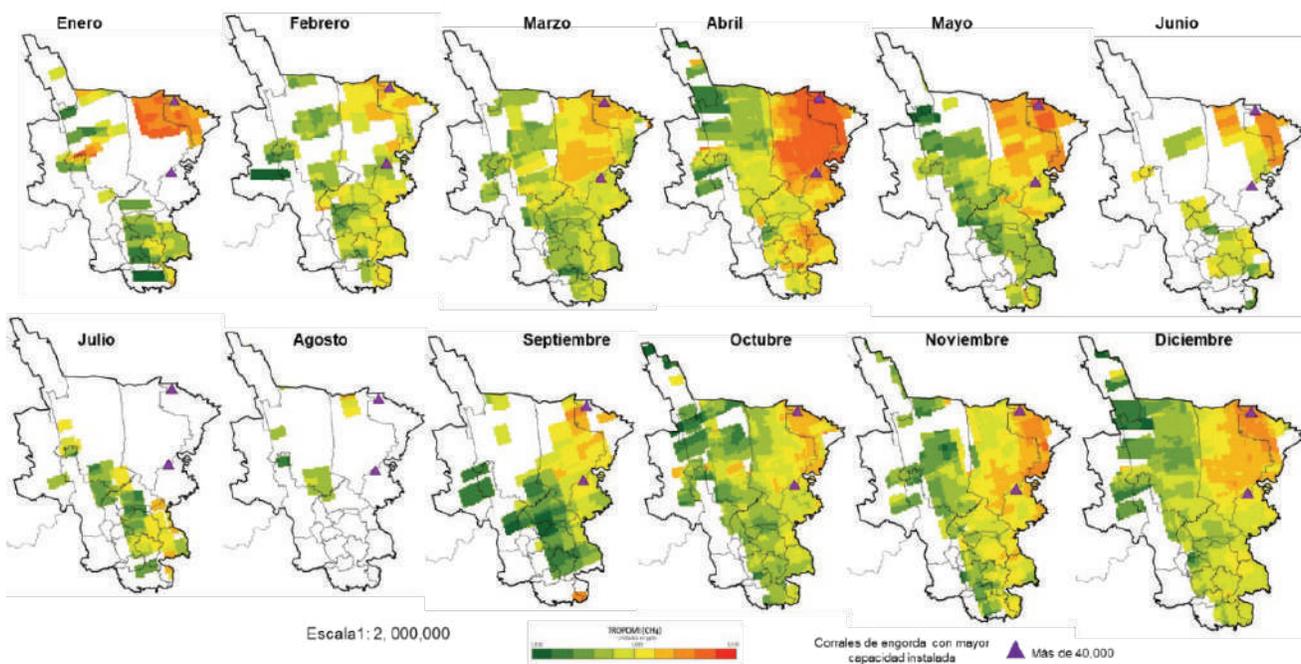
**Figura 7. Cartografía atmosférica y monitoreo de emisiones de metano gastroentérico según capacidad instalada en la huasteca potosina por promedio anual**



**Figura 8. Extracción espectral (data cube) de S5P por puntos de muestreo (ppbv, partes por billón)**



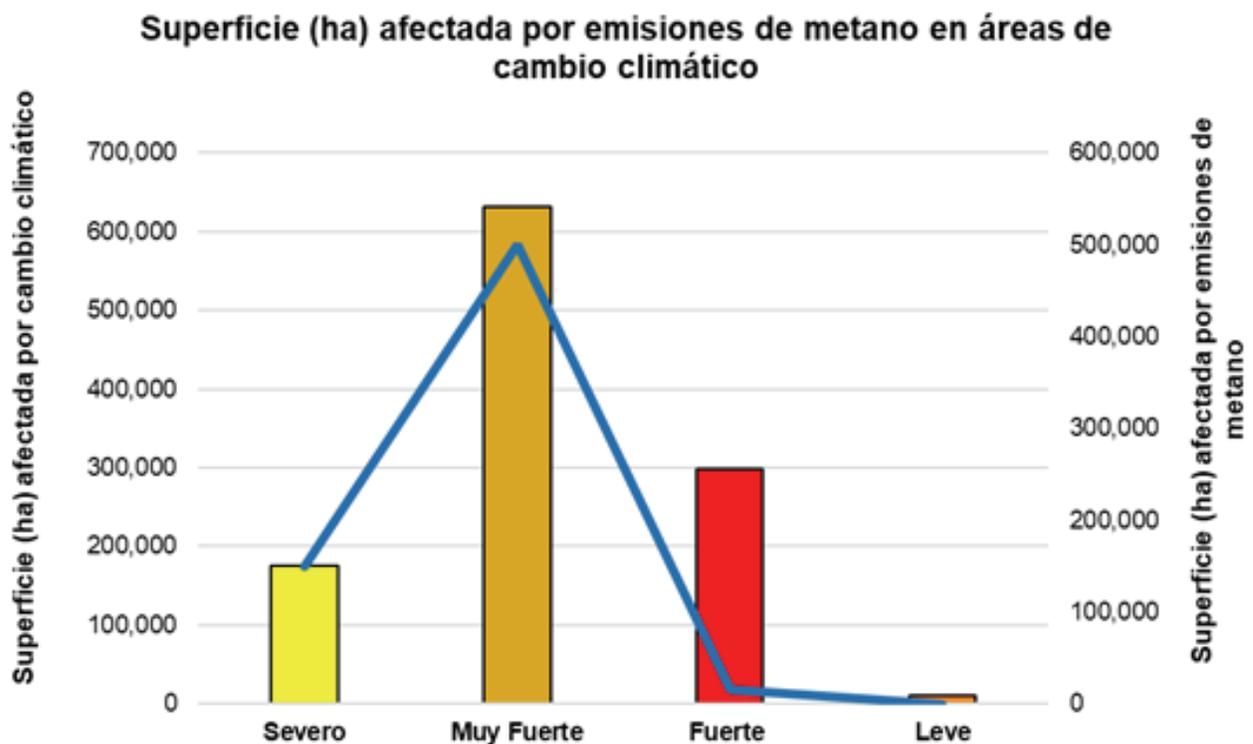
**Figura 9. Monitoreo de emisiones de metano gastroentérico por promedio mensual para la Huasteca Potosina**



El análisis espacio temporal demuestra una alta correlación espacial entre sequías y emisiones de metano gastroentérico (Figura 10), poniendo en riesgo más de 690 mil hectáreas. Los niveles de metano en la atmósfera podrían aumentar en un futuro próximo afectando a las proyecciones sobre el calentamiento atmosférico y edafológico en la región de estudio. Los municipios indígenas y de alta marginación están elevando emisiones  $\text{CH}_4$  (Aquismón, Tanchuítz, Huehuetlán, San Antonio) presentan índices de marginación bajos comparados con los de la Huasteca Norte. Las políticas de adaptación deben ser hacia esas zonas que no cuentan con recursos para un extensionismo sustentable. Sin embargo, las empresas que emiten sin ningún tipo de restricción normativa (porque no se cuenta con una norma nacional en México para emisiones de metano) deberían aplicarse medidas de mitigación, dónde el impuesto ambiental sea la base. Cabe mencionar que es una de las regiones con más golpes de calor a nivel nacional.

**Figura 10. Comparación del área con alto índice de severidad a la sequía y emisiones de metano por S5P en la zona Tamín y Ébano de la Huasteca Potosina.**

*Catástrofe en New Orleans (USA) al paso del Huracán Katrina (2005).*



Los impactos directos al hato ganadero según Segian, 2015, serían los siguientes: en los potreros se espera un cambio en la dinámica de la competencia entre malezas y los pastos debido a los cambios en las tasas de crecimiento de ambos; de igual manera, los aumentos en la temperatura podrían estar generando mayor acumulación de lignina en los pastos, lo que reduciría su digestibilidad en el rumiante, a la vez que el proceso ruminal de degradación de estos pastos estaría emitiendo mayor cantidad de metano.

a la atmósfera. El cambio climático también estaría impactando en las comunidades microbianas (patógenos o parásitos), la propagación de enfermedades transmitidas por vectores. Disminuye cantidad y calidad de esperma y provoca abortos en las hembras.

Se ha demostrado que las mediciones utilizadas en los enfoques de *Top-Down* y *Bottom-Up* presentan escasas espaciotemporales. El establecimiento de un vínculo sólido entre las mediciones atmosféricas de concentraciones de metano a través de imágenes de satélite y los inventarios de emisiones de metano tienen muchos beneficios, que incluyen:

- Estimaciones más precisas de las emisiones de metano,
- Mejor atribución de emisiones a procesos / fuentes específicas,
- Descubrimiento de fuentes o procesos faltantes,
- Detección de tendencias en emisiones sectoriales,
- Mayor confianza en los datos básicos que entran en las decisiones de las empresas y gobiernos, y
- Mejor capacidad para detectar tendencias a lo largo del tiempo.

El progreso en la teledetección de la troposfera ha sido espectacular en las últimas dos décadas. Los avances han sido facilitados en parte por la tecnología mejoras, la creación de los programas por agencias espaciales y también por la comunidad científica a través del trabajo individual y a través de programas nacionales e internacionales. proyectos. Así que hemos pasado de una era de escepticismo sobre el valor del sondeo remoto de trazas de componentes troposféricos desde el espacio, hasta una edad de oro de las primeras observaciones y explotación para la ciencia. Ahora estamos en el comienzo de una era de operaciones aplicaciones y servicios. Esperamos que las medidas se utilicen para lograr desarrollo sostenible que ofrece un medio ambiente que tiene sus servicios ecosistémicos intacto y maximizando el bienestar humano.

## Agradecimientos

Al Fondo sectorial FOSEC CONAHCyT-SCT-AEM B-S-64363, "Modelo de innovación para la identificación y monitoreo de contaminantes atmosféricos a través de tecnología especial", LaNGIF-UASLP 2019-2023.

## Referencias

- Adem, J., Mendoza, M., & Ruiz, A. (2000). Recent numerical experiments on three months extended and seasonal weather prediction with a thermodynamic model. *Atmósfera* 13(2):53-83. ISSN: 0187-6236
- Algará, M., Contreras, C., Galindo MG. y Mejía, J. (2009). Implicaciones territoriales del fenómeno de la sequía en la Huasteca Potosina. *Espaciotiempo* 4 (2009): 56-67.56 PMPCA-UASLP

- Algará, M y Contreras C., (2009). Drought and Climate Change on the Huasteca Region in the State of San Luis Potosi. In book: Environmental Engineering and Management. Chapter: 23. ATINERE, Editors: Michael Theophanides & Theophile Theophanides. ISBN:978-960-6672-50-7
- Ayasse, A., Dennison, P., Foote, M., Thorpe, A., Joshi, S., Green, R., Duren, R., Thompson, D., & Roberts, D. (2019). Methane Mapping with Future Satellite Imaging Spectrometers. *Remote Sens.* 2019, 11, 3054; <https://doi.org/10.3390/rs11243054>
- Benaouda, M., Ronquillo, M., Molina, L., & Castelán, O (2017). Estado de la investigación sobre emisiones de metano entérico y estrategias de mitigación en América Latina. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 8 (4):965-974. ISSN 2007-0934
- Buchwitz, M., Reuter, M., Schneising, O., Bovensmann, H., Burrows, J., Boesch, H., Anand, J., Parker, R., Detmers, R., Aben, I., Hasekamp, O., Crevoisier, C., Armante, R., Zehner, C., & Schepers, D. (2018). Copernicus Climate Change Service (C3S) Global Satellite Observations of Atmospheric Carbon Dioxide and Methane. *Advances in Astronautics Science and Technology* 1:57-60. <https://doi.org/10.1007/s42423-018-0004-6>
- Castelán, A., Ku, J. C., Ángeles, M., Benaouda, G. S., Hernández, T. L., Molina, L. Ramírez, S.V., Castelán, A. R., Praga, F., Lazos, H., Montelongo, M., González, M. F., Vázquez, E., Cardoso, E., Aranda, D., Villegas, A. P., Guadarrama G., & Apodaca. (2019). Ganadería. En: Paz, Hernández, Sosa, Velázquez (eds.) 2019 Estado del Ciclo del Carbono en México: Agenda Azul y Verde. Programa Mexicano del Carbono. México, p. 492-528
- Hernández, P., Cuellar, R. (2007). Zacate Bermuda Tiftón 68: Nueva opción para el establecimiento de padreras bajo riego. INIFAP. CENTRO DE INVESTIGACIÓN REGIONAL DEL NORESTE
- Eckard, R. J., Grainger, C., & Klein C.A. (2010). Options for the abatement of methane and nitrous oxide from ruminant production: A review. *Livestock Science* 130:47-56. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.010>
- EPA (1990). Methodologies for Estimating Greenhouse Gas Emissions, Washington, DC.
- FAO (2018). Soluciones ganaderas para combatir el cambio climático. México.
- Gobierno de SLP (2020). Creció SLP un 74% en producción ganadera, *SLP noticias*: <https://slp.gob.mx/sitionuevo/Paginas/Noticias/2020/OCTUBRE%202020/181020/Creci%C3%B3-SLP-un-74-en-producci%C3%B3n-ganadera.aspx>
- Google Earth Engine. (2023). Sentinel-5P OFFL CH4: Offline Methane, [https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS\\_S5P\\_OFFL\\_L3\\_CH4](https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S5P_OFFL_L3_CH4)
- INEGI. (2017). Conjunto de datos vectoriales de uso de suelo y vegetación, México.
- IPCC. (2007). Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los grupos de trabajo I, II y III al cuarto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra.

- LaNGIF-UASLP (2020). Informe Técnico proyecto Modelo de innovación para la identificación y monitoreo de contaminantes Atmosféricos a través de tecnología espacial, Fondo Sectorial Agencia Espacial Mexicana, Secretaria de Comunicaciones y Transportes CONACyT, clave B3-S-64363.
- Maderey, R. (2005). Principios de Hidrogeografía Estudio del ciclo hidrológico. UNAM., México.
- Reyes H., Aguilar, M., Aguirre, J., Trejo, & I. (2006). Cambios en la cubierta vegetal y uso de suelo en el área del Proyecto Pujal-Coy, San Luis Potosí, México 1973-2000. *Investigaciones Geográficas*, (059), 26-42. ISSN 2448-7279
- Saunio, M., Stavert, A.R., Poulter, B., Bousquet, P., Canadell, J.G., Jackson, R.B., Raymond, P.A., Dlugokencky, E.J., Houweling, S., Patra, P.K., Ciais, P., Arora, V.K., Bastviken, D., Bergamaschi, P., Blake, D.P., Brailsford, G., Bruhwiler, L., Carlson, K.M., Carrol, M., ... & Zhuang Q. (2020). The Global Methane Budget 2000-2017, *Earth System Science Data*, 12 (3). <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>
- Sejian, V., Gaughan, J., Baumgard, L., & Prasad, C. (2015). Climate Change Impact on Livestock: Adaptation and Mitigation. India. Veerasamy et.al (Eds).
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales M., & Haan, D. (2006). Livestock's long shadow. Rome. FAO.
- Tian, Y., Hong, X., Shan, C., Sun, Y., Wang, W., Zhou, M., Wang, P., Lin, P., & Liu, C. (2022). Investigating the Performance of Carbon Monoxide and Methane Observations from Sentinel-5 Precursor in China. *Remote Sensing*. 14 (23), 6045. <https://doi.org/10.3390/rs1423604>
- Toledo, V. (2004). El patrimonio nacional de México, CONACULTA-FCE, México, Coordinador Enrique Florescano, p. 111-135
- Vázquez, M.F., Ku, J.C., González, M., Castillo, E., Kebreab, E., & Castelán, O.A. (2020). Emisiones de metano por fermentación entérica de la ganadería bovina de México: la importancia de contar con inventarios nacionales precisos y de estrategias de mitigación. *Elementos para Políticas Públicas*, 4(1).
- Wang, F., Maksyutov, S., Tsuruta, A., Janardanan, R., Ito, A., Sasakawa, M., Machida, T., Morino, I., Yoshida, Y., Kaiser, J., Maenhout, G., Dlugokencky. E., Mammarella, I., Lavric, J., & Matsunaga, T. (2019) Methane Emission Estimates by the Global High-Resolution Inverse Model Using National Inventories. *Remote Sensing*, 11 (21) 2489. <https://doi.org/10.3390/rs11212489>



## Los retos de la comunicación estratégica ante los eventos meteorológicos extremos: el caso de Jalisco

*García Guadalupe, Mario Enrique*

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías - Universidad de Guadalajara, Jalisco, México. mario.gguadalupe@academicos.udg.mx. Orcid: 0000-0003-2179-4818

*Ulloa Godínez, Héctor Hugo*

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías - Universidad de Guadalajara, Jalisco, México. hector.ulloa@academicos.udg.mx. Orcid: 0000-0002-1888-628X

*Ramírez Sánchez, Hermes Ulises*

Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías - Universidad de Guadalajara, Jalisco, México. ramirez@astro.iam.udg.mx. Orcid: 0000-0003-2975-5215

Citar este capítulo: García Guadalupe, M. E., Ulloa Godínez, H. H., Ramírez Sánchez, H. U. (2024). Los retos de la comunicación estratégica ante los eventos meteorológicos extremos: el caso de Jalisco. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales Hernández, J. C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim. México. Pp: 189 - 205.

### Resumen:

La dinámica de la atmósfera se caracteriza por su constante evolución y cambio; no obstante, las actividades humanas están contribuyendo de manera muy significativa en la alteración de la variabilidad climática natural. Asociado a ello, el crecimiento poblacional incrementa los costos y los daños derivados del impacto de los fenómenos meteorológicos extremos, resaltando que las naciones en desarrollo sufren la mayor parte de las pérdidas humanas y materiales ocasionadas por inundaciones, sequías y tormentas locales severas, entre otros procesos relacionados con la geografía y topografía del territorio habitado. El objetivo de este trabajo fue evaluar la comunicación estratégica ante los eventos meteorológicos extremos, además de, la percepción desde los distintos actores sociales involucrados. Mediante un análisis cualitativo del escenario internacional y basado en la percepción social in situ, se observó que la comunicación es un problema grave en la cual se ha avanzado poco, tanto sobre los avisos y alertas como en la toma de las medidas adecuadas. En este contexto y haciendo hincapié sobre los hallazgos observados, se puede concluir que, para lograr una comunicación efectiva ante la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos, los requisitos elementales es que debe ser clara, concisa, consistente y con conocimiento.

Palabras clave: [Comunicación estratégica](#), [eventos meteorológicos extremos](#), [percepción](#).  
Línea temática: Políticas públicas y estrategia de comunicación.

## Introducción

A medida que el clima mundial continúa cambiando, se incrementan los costos y los daños derivados del impacto de los fenómenos meteorológicos extremos. Si bien, todos los países se ven afectados por desplazamientos de personas que viven en zonas de riesgo, son las naciones en desarrollo las que experimentan las pérdidas humanas, económicas y materiales más significativas, ocasionadas por inundaciones, sequías y tormentas intensas. Estudios reportan hasta un promedio anual de más de 20 millones de personas desplazadas por fenómenos extremos relacionados con el clima (IPCC, 2023).

En este contexto, el informe elaborado por el Banco Mundial (2013) describe la magnitud de los costos de los eventos meteorológicos en términos de víctimas humanas y daños económicos ocasionados a la propiedad privada y en la población con altos índices de pobreza. Un caso trascendente sobre ello lo ilustra el tifón Haiyan que en noviembre del 2013 dejó una estela de muerte y destrucción a su paso por Filipinas.

“En el curso de los últimos 30 años, los fenómenos naturales han ocasionado la muerte de más de 2.5 millones de personas y daños materiales por el valor de casi 4 billones de dólares en todo el mundo. Las pérdidas económicas van en aumento - de 50 000 millones de dólares al año en la década de los 80’s, a poco menos de 200 000 millones al año en el último decenio -. Además, aproximadamente las tres cuartas partes de esas pérdidas obedecen a fenómenos meteorológicos extremos” (BM, 2013, p.5).

Las mejoras en la modelización de los huracanes, la instrumentación de observación y la capacitación en materia de predicción, han aumentado considerablemente la precisión de los pronósticos. Si bien los huracanes no pueden ser controlados, la vulnerabilidad a estas complejas tormentas puede reducirse mediante la preparación y capacitación. Los sistemas de alerta temprana y la precisión alcanzada a la fecha, han permitido salvar vidas y reducir los daños a la propiedad causados por los ciclones (NOAA, 2017). El informe 2021 de la Organización Meteorológica Mundial reporta un análisis de datos relacionados con desastres durante el periodo 1970-2019, exponiendo que, ese perfeccionamiento de las alertas y una mejor gestión de los desastres, ha disminuido casi tres veces durante ese lapso el número de víctimas mortales registradas. Los beneficios derivados de los sistemas de alerta temprana multiplican por más de diez la inversión realizada; pese a ello, una de cada tres personas en el mundo sigue sin estar cubierta por servicios de alerta temprana (OMM, 2022). Esto último coincide con lo expuesto por MacIntyre *et al.* (2019) y NOAA (2022) sobre las alertas y precisión alcanzada, ya que se pueden generar beneficios más significativos en relación a su costo inicial. No obstante, continúa siendo un problema lograr una comunicación efectiva dentro de la sociedad sobre los avisos y alertas para la toma de las medidas adecuadas (MacIntyre *et al.*, 2019; NOAA, 2022).

En relación con los avances científicos sobre la previsión meteorológica durante los últimos 30 años, se puede mencionar que: 1). La reducción en alrededor del 50% del error promedio en los pronósticos de trayectoria de los Ciclones Tropicales para los intervalos de 24, 48 y 72 horas (Alley et. al., 2019). 2). Los pronósticos extendidos (con un grado aceptable de confianza) sobre el acumulado de lluvia y el comportamiento de las temperaturas hasta con cinco meses de antelación a través de modelos numéricos globales; los cuales son una herramienta de gran ayuda para la toma de decisiones oportuna (Sterman, 2008, Alley et. al., 2019) y, 3). Los avisos efectivos a muy corto plazo (0 - 12 horas) sobre las Tormentas Locales Severas (viento fuerte, granizo, lluvias torrenciales y tornados), son más confiables y utilizados alrededor del mundo (Alley et. al., 2019).

Así pues, los avances científicos sirven para mitigar los efectos adversos de estos fenómenos en la sociedad, la cual cada día se multiplica y tiende a habitar zonas que representan un riesgo significativo (deslaves, hundimientos, inundaciones, contaminación atmosférica, entre otros).

Entre algunos referentes, a finales de los 90's, Villalobos (1998) señaló que la información orientada a prevenir desastres desempeña una función básica; no solo informar a través de sonidos, imágenes o palabras impresas, sino explicar el significado de los hechos y ser guías en un terreno incierto. Por su parte, Castillo et al. (2007) reportaron la necesidad de una cultura de la prevención en que los medios deben informar, educar y orientar, en concordancia con una planificación que incluya al riesgo como una realidad, considerando el contexto económico, organizativo, cultural, tecnológico y ecológico. En fechas más recientes, Rosas y Tello (2012) destacaron que una información veraz y oportuna genera conocimiento y contribuye a construir una cultura del riesgo que sirve para desarrollar la habilidad social en materia de prevención y resiliencia al mismo. Asimismo, Velev y Zlateva (2012) mencionaron que las redes sociales juegan un papel trascendente ya que los mismos pueden actuar de forma inmediata en la resolución de problemas durante los desastres naturales, pero a la vez, pueden ser peligrosas fuentes de desinformación. Por último, Morales et al. (2016), a través de un trabajo colaborativo remarcaron que los expertos deben ofrecer la mejor información al ciudadano, destacando nuevamente la importancia del uso de las redes sociales como mecanismos instantáneos y masivos de prevención. Además, abogan por aprender de las catástrofes ocurridas como una oportunidad para desarrollar la cultura de la prevención. También, manifiestan la necesidad de encontrar un equilibrio en el papel que deben desempeñar las agencias de meteorología, las empresas, los medios de comunicación y los servicios de Protección Civil en sus distintos niveles.

Los referentes mencionados entrelazan una serie de funciones que son aún más importantes si se consideran los desafíos que conlleva la comunicación trascendente y necesaria para el desarrollo de una cultura de conocimiento y actuación preventiva. La comunicación estratégica relacionada con los fenómenos meteorológicos se refiere a

la forma en que se comunica la información a la población sobre el clima y los eventos meteorológicos extremos. Algunas teorías sobre la comunicación estratégica relacionada con los fenómenos meteorológicos son: 1) Teoría de la comunicación de riesgos, que se enfoca en cómo se comunica el riesgo a la población y cómo se puede mejorar la comprensión y la respuesta al mismo. Ésta teoría se aplica para comunicar los riesgos asociados con los eventos meteorológicos extremos y cómo se pueden mitigar (DOUE, 2023); 2) Teoría de la comunicación científica que se enfoca en cómo se comunica la información científica a la población de manera clara y comprensible. En el contexto de los eventos meteorológicos extremos, esta teoría se aplica para comunicar la información científica sobre el clima y los eventos meteorológicos de manera accesible (Díaz, 2020); y 3) Teoría de la percepción pública del riesgo, conducente en cómo la población percibe el riesgo y cómo se puede mejorar la comprensión y la respuesta a los riesgos. En el contexto de los eventos meteorológicos extremos, esta teoría se aplica para comprender cómo la población percibe estos eventos y cómo se puede mejorar la comunicación para mejorar la respuesta (Kindelán, 2013).

En este contexto, desde la perspectiva de la comunicación, se hace necesario tomar en consideración que la memoria humana puede ser selectiva y estar influenciada por diversos factores, como la atención y el interés en un evento en particular, en este caso el clima. Una acción o comportamiento que se repite en los seres humanos es “tener memoria corta” sobre los eventos meteorológicos que ocurren en el territorio. Ejemplo de ello, es que año con año se menciona que hace más calor que el año pasado, que llovió más fuerte este año que el anterior y así sucesivamente, aunque los datos digan lo contrario; además de pensar o asegurar que su memoria es prodigiosa, conduciendo a la toma de decisiones erróneas (UNESCO, 2018). Por su parte, el concepto de los comunicadores sociales sobre la información es todo mensaje que logra disminuir la incertidumbre y se reconoce con un intercambio de información, pero en muchas ocasiones los medios de comunicación tienden a proporcionar información incompleta y exagerada que conduce a una interpretación incorrecta de la misma; en consecuencia, la cultura del miedo y, por ende, la implementación inadecuada de medidas de protección a la población. Se debe hacer una reflexión sobre el nuevo papel que desempeñan ahora los comunicadores y más aun tomando en cuenta la influencia de las redes sociales (Jiménez, 2023).

Un ejemplo de ello, que en cierta manera puede interpretarse como un clásico, es la frase “nunca había llovido en mayo”. Sin embargo, si se regresa en el tiempo al menos 35 años, Miguel Aceves Mejía interpretaba la canción “Los aguaceros de mayo” haciendo referencia a la presencia típica de precipitaciones para ese mes. Es decir, comunicar adecuadamente representa una tarea difícil y son varias las aristas que forman parte del problema.

En este sentido, la comunicación es una actividad específica de la cultura, que contrasta con las leyes de la física atmosférica que ofrecen la misma solución a un problema determinado

aplicable a cualquier región del mundo. La dinámica atmosférica es una rama de la física que se dedica al estudio de las leyes que rigen los movimientos del fluido atmosférico, y en esta disciplina se estudian los aspectos físicos y matemáticos de la dinámica de la atmósfera (euroinnova, 2023). Por otro lado, la comunicación es una actividad social y cultural que tiene como objetivo transmitir información y conocimiento entre individuos y grupos. La memoria humana es un factor importante en la comunicación, ya que puede ser selectiva y estar influenciada por diversos elementos, como la atención y el interés en un evento en particular (UNESCO, 2018)

En el mismo sentido, Estrada et. al., (2013), puntualizan que la comunicación sobre desastres se caracteriza como un proceso complejo, multidisciplinario, multidimensional y envolvente, que no se puede reducir a meras campañas de información, sino que debe incluir el manejo de los conflictos asociados y evitar su minimización o evasión. Entre algunas de las estrategias de reducción del riesgo de desastres, está el promover una población con capacidad de reacción, capaz de reducir el impacto económico, social y cultural en caso de un evento peligroso. No es aconsejable, asumir políticas triunfalistas, pesimistas o apáticas; no se debe improvisar, exagerar o subestimar, sobreentender, retener datos, adelantarse a la investigación, especular, mentir o culpabilizar, mezclar mensajes, no corregir rumores o utilizar portavoces no adecuadamente preparados, cuando de gestión de riesgos se trata. La sociedad requiere información veraz y en tiempo adecuado, lo que emplaza a las instituciones responsables a facilitarla correctamente. Las repercusiones sociales de pequeños o grandes errores en la comunicación del riesgo pueden ser -de hecho, han sido- enormes y trascendentales.

En relación a ello, la UNESCO (2014) puntualizó que la comunicación en la gestión del riesgo sobre desastres, no sólo es informar y formar, sino que es un proceso dinámico, intersectorial, interinstitucional e interdisciplinario, que requiere de una relación y coordinación entre los actores como parte de una estrategia efectiva de comunicación. En este sentido, Hilderbrand (2014), hace referencia al documento de la Administración Nacional del Océano y de la Atmósfera de Estados Unidos de América (NOAA), denominado "Construyendo una Nación Meteorológicamente Preparada" en el cuál se asume el compromiso de que las comunidades estén listas para responder ante fenómenos extremos de forma apropiada. La prioridad estratégica es la de aumentar la capacidad de resistencia de la comunidad ante una vulnerabilidad cada vez mayor a los peligros por episodios extremos de carácter meteorológico, hidrológico, climatológico y medioambiental. Así, la NOAA mejora los servicios de apoyo a la toma de decisiones basadas en los impactos, combina la ciencia y avances tecnológicos en el proceso del pronóstico, aplica la investigación en materia de ciencias sociales para mejorar la comunicación y la utilidad de la información, y amplía sus esfuerzos de difusión para conseguir un desarrollado alcance de preparación, capacidad de respuesta y resistencia. Estos cuatro componentes están ayudando para asegurar que la información, los

productos y servicios de la NOAA sean ampliamente utilizados para minimizar el impacto general en la sociedad de los fenómenos extremos.

**Comunicación y divulgación.** Los mensajes de preparación y educación acerca de cómo aplicar la información de las predicciones de la NOAA y de sus beneficiarios de la industria meteorológica para la toma de decisiones se centran en tres objetivos, 1) que estén orientados hacia la acción, 2) que sean mensajes coherentes sobre los riesgos previstos, y 3) que lleguen a las poblaciones vulnerables de las formas más eficaces. La información de divulgación orientada a la preparación y los eventos a nivel comunitario están diseñados para producir una acción, no solo para sensibilizar. La coherencia del mensaje es vital para que los usuarios confíen lo suficiente en la información como para actuar en base a ella (NOAA, 2021).

**Suministro de información.** La información, por ejemplo, los avisos de socorro por condiciones meteorológicas adversas, debe ser recibida por los usuarios de la manera que ellos esperan, usando tecnología con la que estén familiarizados. La NOAA se ha asociado con la Agencia Federal para Manejo de Emergencias (FEMA) y con compañías privadas de telefonía móvil para suministrar alertas para móviles a través de torres de telefonía móvil en áreas de riesgo. Estas alertas indican a los usuarios que busquen información adicional y refugio seguro. La información proporcionada por los teléfonos móviles contribuye a contar con un sistema de suministro de información de múltiples fuentes, que se suma a la existencia de otras fuentes más tradicionales como las transmisiones de televisión, Internet y las emisoras meteorológicas de radio (NOAA, 2021).

Finalmente, Morales *et al.* (2016) y Saleem (2015), refirieron que los medios sociales han cambiado la forma de comunicación; se están convirtiendo en una herramienta para salvar vidas. En teoría, es un modelo de comunicación completa donde un usuario envía información, recibe retroalimentación y responde a ella. En este orden de idea, Salazar *et al.* (2016), manifestaron que la comunicación convencional deja de funcionar durante el desastre, mientras que, en muchos casos, las redes sociales permanecen activas. Esta herramienta permite a los actores colaborar en la mitigación, preparación, respuesta y recuperación.

Ante semejantes retos, las propuestas que los expertos plantean para mejorar la comunicación de catástrofes, como la ocurrida con el Huracán Katrina en la ciudad de New Orleans (ver la Figura 1 abajo), implican el fortalecimiento en la formación de los profesionales y la creación de una agencia que pueda centralizar toda la información de una manera eficaz y coordinada entre expertos, autoridades y mecanismos de salvamento. Se recalca que los expertos, la protección civil y los comunicadores (en los distintos medios), no pueden hacer su trabajo de manera aislada; por el contrario, todos son actores fundamentales en el proceso de la comunicación a la sociedad (Pérez 2008; Buxton and Hayes 2015; Gaeta N., 2015).

**Figura 1. Catástrofe en New Orleans (USA) al paso del Huracán Katrina (2005).**



**Fuente:** [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/KatrinaNewOrleansFlooded\\_edit2.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/3d/KatrinaNewOrleansFlooded_edit2.jpg).

Ante este contexto, los miembros del Cuerpo Académico Geociencias Ambientales Aplicadas de la Universidad de Guadalajara, han desarrollado una serie de estudios encaminados a mejorar la comprensión y la comunicación efectiva sobre los pronósticos de eventos meteorológicos extremos en el Estado de Jalisco. Más específicamente, el objetivo consiste en analizar mediante encuestas, el nivel de conocimiento de los actores sociales sobre la comunicación estratégica en relación a los eventos meteorológicos extremos.

Lo primero es evaluar el grado en que la comunicación sobre la información meteorológica es comprendida por la mayoría de la población y por los tomadores de decisiones, de tal manera que se efectúen las medidas adecuadas para proteger las vidas humanas y los bienes materiales; enseguida, determinar mediante encuestas el nivel de satisfacción de la sociedad sobre los productos y servicios que ofrece el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), la Universidad de Guadalajara a través del Instituto de Astronomía y Meteorología (UDG/IAM), los medios masivos de comunicativos y las redes sociales; lo anterior, para mostrar y sensibilizar a los comunicadores y a la población en general sobre la trascendencia de la comunicación efectiva.

## **Materiales y métodos**

De forma general, la percepción constituye un proceso dialéctico en la construcción del conocimiento, a partir de la experiencia acumulada en el tiempo. La relación entre el ser humano y su territorio es, en parte, el reflejo de las percepciones en un contexto

determinado, donde a su vez, el individuo construye su espacio e implementa mecanismos de resiliencia (Padilla y Luna, 2003). Así, la percepción de la población con respecto al tiempo meteorológico y a la variabilidad climática, les permite razonar comportamientos y grados de precaución a considerar para hacer frente a los eventos extremos (Max-Neef *et al.*, 2010). Esto permite diseñar estrategias de adaptación que contemplen, tanto el registro de la información climática como la realidad local experimentada por la población.

El presente trabajo se sustenta en un diseño descriptivo que permite caracterizar la percepción social sobre los eventos meteorológicos extremos y la interpretación de los mismos. En relación a ello, se diseñó una encuesta basada en la revisión de la literatura sobre esta temática (Velarde, 2012; Pinilla *et al.*, 2012; Vergara, 2011), y en la experiencia acumulada por los autores y ajustada a la realidad local.

La encuesta aplicada fue estructurada en cuatro módulos y organizada en ocho preguntas agrupadas en cuatro rubros: 1) Datos generales del encuestado, 2) Mecanismos de acceso a la información, 3) Percepción y satisfacción sobre la información recibida, y 4) Nivel de respuesta ante los eventos meteorológicos extremos (ver la Figura 2 abajo).

**Figura 2. Grado de conocimiento social ante la presencia de eventos meteorológicos extremos y sus posibles alternativas de actuación, tanto de carácter individual como colectivo. Fuente: Elaboración propia apoyado en un diseño descriptivo.**

**Encuesta de percepción social sobre la información meteorológica**

**1) Datos generales (Marque con una X)**

A. **Genero.** Masculino  Femenino

B. **Edad.** Entre 15 - 25 años  Entre 26 - 40 años  Mayores a 40 años

C. **Nivel educativo.**

a. Nivel básico (sin estudios, primaria o secundaria).

b. Nivel medio superior (Preparatoria y / o técnica).

c. Nivel superior (Licenciatura y/o posgrado).

**2) Mecanismos de acceso a la información (marque solo una)**

A. TV canal local

B. TV canal Nacional

C. Radio

D. Redes sociales

E. Páginas web (IAM / SMN)

F. Periódico

G. APPs (teléfono móvil)

H. Otro medio  Indique cual \_\_\_\_\_

**3) Percepción y satisfacción sobre la información recibida**

A. ¿Considera Usted que es confiable y profesional la persona que le brinda la información del tiempo y clima en los diferentes medios de comunicación?  
SI  NO

B. La duración del comunicador del estado del tiempo y clima lo consideras...  
De poco tiempo  Largo tiempo   
Comentarios: \_\_\_\_\_

C. ¿Entiende Usted los carteles que utilizan los comunicadores del tiempo y clima de los distintos medios de comunicación?  
SI  NO

**4) Nivel de respuesta ante los eventos meteorológicos extremos**

A. ¿De la información recibida sobre el tiempo y clima, Usted puede decidir qué acciones debe realizar ante una amenaza de evento extremo (evacuar, proteger su vivienda, podar arboles, entre otros)?  
SI  NO

SMN: Servicio Meteorológico Nacional - IAM: Instituto de Astronomía y Meteorología

**Fuente:** Elaboración propia apoyado en un diseño descriptivo.

De esta manera, se logró determinar el grado de conocimiento de los actores involucrados y sus posibles alternativas de gestión, tanto de carácter individual como colectivo, detectando el nivel de satisfacción sobre los productos y servicios que ofrece el SMN, la UDG/IAM, los medios de comunicación y las redes sociales.

En cuanto al manejo de la información (colección de datos), se ejecutaron un total de 600 encuestas (durante el periodo 2017-2018), las cuales se realizaron de la siguiente manera:

- En dos talleres sobre problemas ambientales se encuestaron 150 personas.
- Dentro del programa de los “Viernes de Ciencia (Conferencias)” celebrados en el Instituto de Astronomía y Meteorología, se realizaron 250 encuestas en 5 eventos.
- Entre conferencias con los agricultores y población costera del estado de Jalisco, se efectuaron 200 encuestas.

Posteriormente, se clasificaron las respuestas, por género, grupos etáreos, nivel educativo, percepción, fuente y satisfacción de la información, además del nivel de respuesta ante eventos meteorológicos extremos. Las encuestas aplicadas fueron tratadas mediante estadística descriptiva.

## Resultados y discusiones

Los resultados obtenidos de las encuestas quedaron detallados en la Tabla 1, como se muestra a continuación abajo.

**Tabla 1. Clasificación de las respuestas, por género, grupos etáreos, nivel educativo, percepción, fuente y satisfacción de la información, además del nivel de respuesta ante eventos meteorológicos extremos.**

Género	Grupos etáreos	Nivel educativo
Mujeres: 41 %	Entre 15 y 25 años: 35%	Básico - sin estudios, primaria y secundaria: 17%
Hombres: 59%	Entre 26 y 40 años: 43%	Medio superior - preparatoria y técnico: 47%
	Mayores de 40 años: 22%	Superior - licenciatura y posgrado: 36%

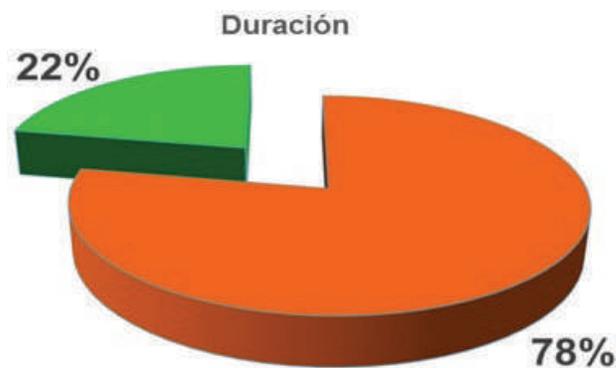
**Fuente:** Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos por la encuesta.

Por su parte, el análisis integral realizado en los apartados 2), 3) y 4) de la encuesta (ver Figura 2 arriba), permitió identificar los rasgos más significativos relacionados con la comunicación efectiva, considerando la principal fuente de información, el nivel de percepción, satisfacción, y el grado de conocimiento que tiene la sociedad ante la presencia de eventos meteorológicos extremos. Así, se tiene que los problemas

detectados en relación con la información y su comprensión se resumen en: i) una saturación de la información que no es clara ni específica para la zona de interés del usuario, ii) gran parte de las fuentes de información carecen del personal especializado, y iii) los mensajes a través de las redes sociales son poco objetivos (ajenos a la realidad) y, por lo tanto, carecen de valor para la toma de decisiones. Presentamos esos retos en más detalle a continuación.

Por un lado, la saturación de información se refiere a la existencia de gran cantidad de supuestos experimentados y falsos concedores del tiempo meteorológico que no tienen la capacidad para transmitir en forma concisa la información que la sociedad debe conocer de manera oportuna. En la Figura 3 se reporta la opinión de los encuestados en la que mencionan que los comunicadores utilizan demasiado tiempo para ofrecer un mensaje que, en general, es exagerado y poco adecuado (78%). Sólo el 22% de los encuestados aprueba la duración del mismo. Además, las simulaciones y la estimulación visual que utilizan al dar a conocer la información meteorológica, no permiten que se capte la utilidad del mensaje.

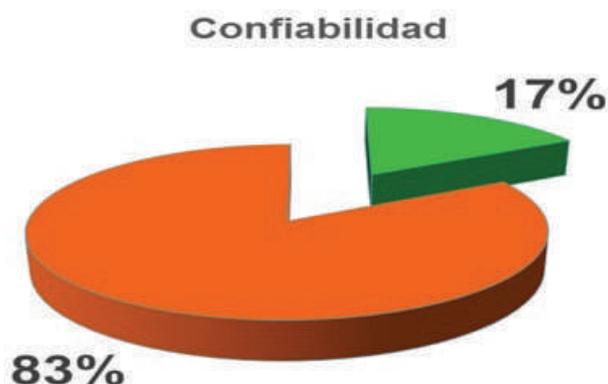
**Figura 3. Percepción y satisfacción sobre la información recibida.**  
Duración adecuada: 22%.



**Fuente:** Elaboración propia con datos de la encuesta.

Por otro lado, la carencia de personal especializado señala que, en la actualidad, la TV local es uno de los principales medios de noticias sobre el tiempo meteorológico; sin embargo, predomina la imagen visual o el atractivo por encima del conocimiento (ver Figura 4 abajo). En relación a ello, el 83% de los encuestados considera que el comunicador no es profesional y, por lo tanto, no le inspira confianza. No obstante, es oportuno señalar que, en el Estado de Jalisco, con el Canal 44 de la Universidad de Guadalajara y Canal 4 de Televisa Gdl, se ha logrado palear lo antes mencionado. Un ejemplo de una buena comunicación se alcanzó con el seguimiento del Huracán Patricia (2016), donde un experto en huracanes estuvo informando durante cada hora sobre la trayectoria, su impacto y las medidas adecuadas a implementar.

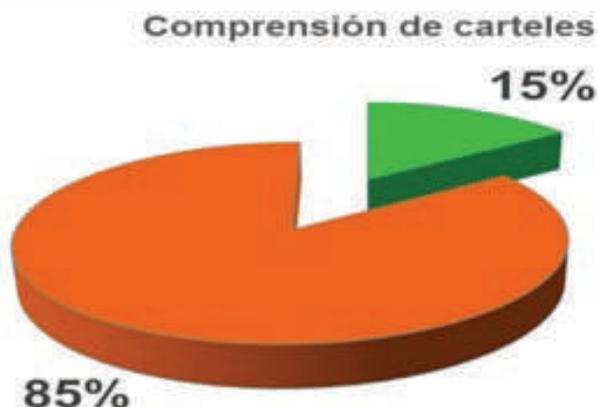
**Figura 4. Percepción y satisfacción sobre la información recibida.**  
**Confiabilidad: 17%.**



**Fuente:** Elaboración propia con datos de la encuesta.

Finalmente, y en cuanto a los mensajes a través de redes sociales, otros medios que carecen de profesionales en la meteorología son la mayoría de las redes sociales y el uso de fuentes personales (internet, teléfonos celulares, apps, entre otros), debido a la obtención de falsos criterios sobre las medidas a tomar ante la presencia de un evento meteorológico extremo. Por otra parte, los gráficos merecen una atención especial debido a que son una herramienta para expresar de manera sintética (mensaje corto), una información trascendente. En la Figura 5 se exponen las respuestas donde se destaca que el 85% de los encuestados no comprenden los gráficos plasmados en los carteles; solo el 15% los considera adecuados.

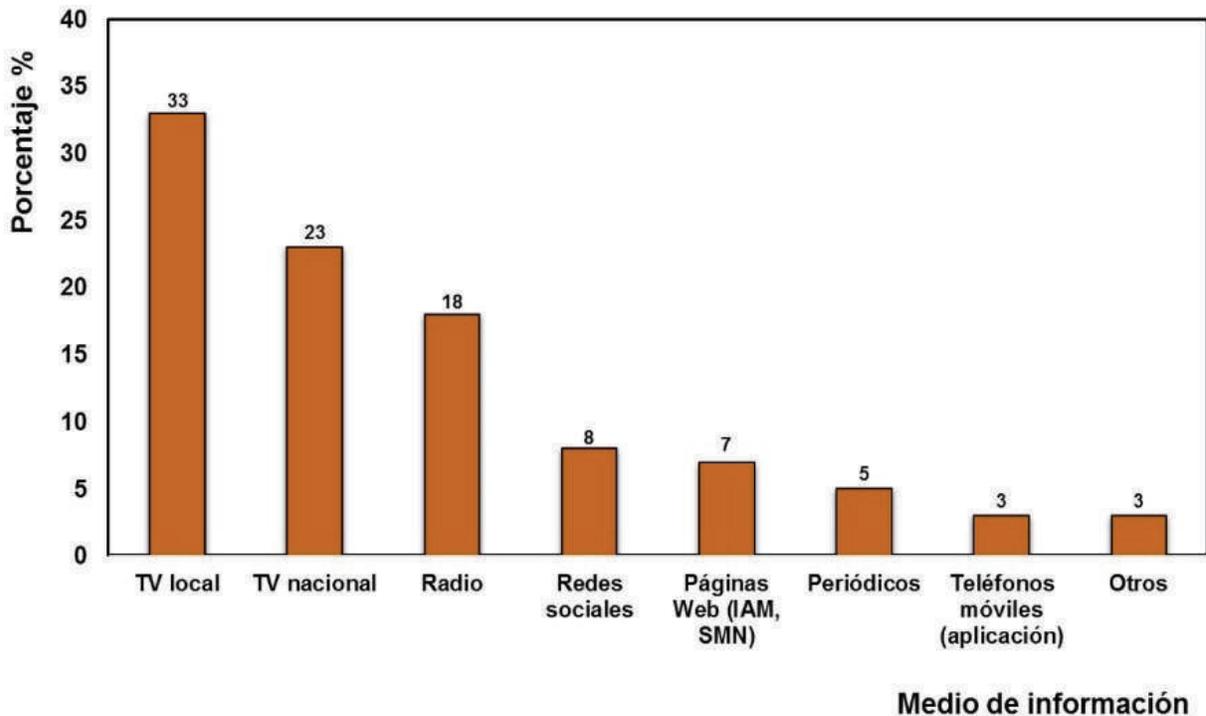
**Figura 5. Percepción y satisfacción sobre la información recibida.**  
**Comprensión de carteles: 15%**



**Fuente:** Elaboración propia con datos de la encuesta.

Ante este panorama, en la Figura 6 abajo, se mencionan las fuentes principales (y/o más preferidas) mediante las cuales la población se documenta o se informa sobre el estado del tiempo y los eventos meteorológicos extremos.

**Figura 6. Fuentes principales mediante las cuales la población se informa sobre el estado del tiempo y los eventos meteorológicos extremos.**



**Fuente:** Elaboración propia con datos de la encuesta.

Se observó que la TV local es la fuente de información más utilizada por los actores sociales a cerca de las noticias sobre el tiempo meteorológico y el clima; en este orden, le sigue la TV nacional y la Radio. En contraparte, se evidenció que las páginas web del SMN y el IAM no han logrado penetrar de manera adecuada en las preferencias de la sociedad. Por tal motivo, los Servicios Meteorológicos nacionales y locales deben implementar acciones encaminadas a lograr una mayor aceptación y credibilidad sobre la información proporcionada por sus diversas plataformas.

La implementación de un conjunto de estrategias adecuadas para alcanzar una mejor comunicación, permite que la sociedad responda conscientemente a un mensaje de advertencia. Indudablemente, esto lo relaciona con la creencia de que existe un peligro real, teme por su vida o la de su familia y sabe cómo actuar ante tal situación; además de tener los recursos para proceder. En la Figura 7 se reporta la capacidad de decisión (57%) que la población tiene ante un mensaje de advertencia. Esta capacidad no

necesariamente se relaciona con la mejor alternativa. Además, cabe subrayar que el 43% de los encuestados no se siente capaz de decidir, lo cual es una señal de alerta que debe ser abordada por las autoridades correspondientes.

**Figura 7. Nivel de respuesta ante eventos meteorológicos extremos.  
Capacidad de decisión: 57%.**



**Fuente:** Elaboración propia con datos de la encuesta.

De la información obtenida en esta investigación, se concluye que los requisitos básicos para lograr una comunicación efectiva ante la ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos, es que ésta debe ser clara, concisa, consistente y con conocimiento.

Asimismo, en los avisos y advertencias se deben destacar los siguientes aspectos:

- Indicar el peligro, los posibles impactos y la vulnerabilidad de la región.
- Las acciones protectoras a tomar.
- El pronóstico del evento, cuantificando el peligro.
- La confianza sobre la información emitida y el tiempo en que la información complementaria ayudará a explicar el escenario bajo incertidumbre.

Es posible alinear la percepción con la realidad a través de las ciencias sociales y encontrar formas eficaces de comunicar el riesgo derivado de los eventos meteorológicos extremos, además de adquirir retroalimentación de cómo las personas interpretan los avisos y las advertencias.

Aunque no hay una respuesta única entre los sociólogos y comunicadores, existe un consenso en que los colores fríos (azul y verde) son los mejores para representar un

riesgo bajo; mientras que los colores cálidos (rojo, naranja y magenta) son los adecuados para visualizar riesgos altos (Sherman-Morris, *et al.* (2015). Lo anterior se relaciona con el semáforo vial que es una de las formas visuales más conocidas por la sociedad.

Los pronósticos sólo serán buenos en la medida que la población y distintos actores sociales lo tomen en cuenta. De ahí, la necesidad de que los expertos tengan suficiente capacidad para convencer a la sociedad de hacer caso a la ciencia; es decir, confiar en los pronósticos que se emiten. Adicionalmente, la información debe ser estimulante, visualmente atractiva, actualizada y escrita con un lenguaje sencillo donde predomine un nivel de lectura entre quinto y octavo grado de estudios. Por su parte, al presentar un gráfico, éste debe incorporar la explicación en texto para su mejor interpretación.

Finalmente, como bien se menciona en la iniciativa “Nación Meteorológicamente Preparada” (Buxton and Hayes, 2015, Hilderbrand, D., (2014)), la prioridad estratégica sobre la comunicación encierra a todos los países del mundo y enfrentan los mismos retos, resaltando el aumento de la vulnerabilidad, la cuantificación de la importancia social y la divulgación de la ciencia: -es posible aprender unos de otros mediante el diálogo y la cooperación para mejores prácticas-.

## Reconocimiento

Se reconoce a las personas que se involucraron tanto en atender la encuesta como en la compilación de las respuestas.

## Referencias

- Alley R., Emanuel K. and Zhanga F., (2019). Advances in weather prediction. Better weather and environmental forecasting will continue to improve well-being. *Science* 363, 342-344. DOI: 10.1126/science.aav7274. <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10109891>.
- Banco Mundial, (2013). Informe anual 2013: Pobreza-Prosperidad: Poner fin a la pobreza extrema - promover la prosperidad compartida. + Sostenibilidad ambiental, social y económica. 63. Obtenido del sitio web de Documentos Oficiales: <https://openknowledge.worldbank.org>.

- Buxton N., Hayes A., (2015) Ten years on: Katrina, militarisation and climate change. Consultado en: <https://www.tni.org/es/art%C3%ADculo/diez-anos-despues-del-huracan-katrina-militarizacion-y-cambio-climatico?translation=en>
- Castillo, D., Martínez, J., y Batllori, E. (2007). Los medios de comunicación masiva ante los fenómenos naturales. *Revista Espacios Públicos*. 244.
- Curso de dinámica de la atmósfera: Especialista en dinámica atmosférica. International Online Education. Fecha de consulta: 23/08/2023. <https://www.euroinnova.us/dinamica-de-la-atmosfera#>.
- Diario Oficial de la Unión Europea (DOUE, 2023). Comunicaciones procedentes de las instituciones, órganos y organismos de la unión europea. Comisión europea. Comunicación de la comisión. Directrices sobre las estrategias y los planes de adaptación de los Estados miembros (2023/C 264/01). <https://www.boe.es/doue/2023/264/Z00001-00031.pdf>.
- Díaz, D. (2020). La meteorología en los medios de comunicación. *Medio Ambiente y Desarrollo*, 20(39). Centro Meteorológico Provincial de Cienfuegos, Cuba.
- Estrada M., Espinosa I. y Vinajera C., (2013). Threats, disasters and communication/ risk prevention. Trinomy that requires a change of mind towards childhood. *Multimed* 17(1); 9-10. Cuba. <https://www.medigraphic.com/pdfs/multimed/mul-2013/mul131m.pdf>
- Gaeta N., (2015). La Intervención Comunicativa para la Reducción del Riesgo de Desastres. Análisis de las políticas y las prácticas comunicativas en tiempos normales. Universidad Complutense de Madrid. Comunicación, cambio social y desarrollo. [https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-73273/TesisDoctoral\\_NGaeta.pdf](https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-73273/TesisDoctoral_NGaeta.pdf).
- Hilderbrand, D., (2014). Construyendo una Nación Meteorológicamente Preparada. *Boletín de la OMM* 63(2): 26-27 (BolOMM 63\_2-7.pdf).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). Health, Wellbeing and the Changing Structure of Communities. In *Climate Change 2022 - Impacts, Adaptation and Vulnerability: Working Group II Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1041-1170). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/9781009325844.009
- Jiménez N., (2002). Revolución de la información. Los medios de comunicación. Fecha de consulta: 22/08/2023 en <https://www.rppnet.com.ar/caracteristicas-de-los-medios-de-comunicacion.php>.
- Kindelán C., (2013). Percepción, información y comunicación del cambio climático. Conocimiento en estudiantes universitarios. Universidad de las Palmas de Gran Canaria (ULPGC). Programa de Doctorado: Formación del Profesorado. Pp:380. Consultado en: [file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/0686834\\_00000\\_0000.pdf](file:///C:/Users/Lenovo/Downloads/0686834_00000_0000.pdf).
- MacIntyre E., Khanna S., Darychuk A., Copes R., Schwartz B., (2019). Evidence synthesis - Evaluating risk communication during extreme weather and climate change: a scoping review. *HPCDP Journal*. 39(4): 142-156. ISSN 2368-738X <https://doi.org/10.24095/hpcdp.39.4.06>.

- Max-Neef M., Elizalde A., Hopenhayn M., (2010). Desarrollo a escala humana, opciones para el futuro. 2a ed., Biblioteca CF+S. Madrid, España.
- Morales, E., Lozano C., y Sánchez M. (2016). Procesos cualitativos en la Comunicación de Catástrofes de Origen Natural: el discurso de los Expertos frente al discurso de los Periodistas. *Revista de Estudios para el Desarrollo Social de la Comunicación*, 13, 248-269.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (2017). El modelo del HWRF lidera el rendimiento de la temporada de huracanes del Atlántico de 2017. <https://www.aoml.noaa.gov/es/hwrf-model-leads-the-pack/>
- National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2021). Information Quality Guidelines. Zachary Goldstein, Chief Information Officer.
- National Oceanic and Atmospheric Administration (2022). A weather-ready nation for all? The Demographics of Communicating Severe Weather. NOAA Weather Program Office. Consultado en <https://wpo.noaa.gov/weather-ready-nation-for-all-the-demographics-of-severe-weather-communication/>.
- Organización Meteorológica Mundial (2022). Los sistemas de alerta temprana deben proteger a todo el mundo en un plazo de cinco años. Consultado en: <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/los-sistemas-de-alerta-temprana-deben-protger-todo-el-mundo-en-un-plazo>.
- Padilla y Sotelo S., Luna A., (2003). Percepción y conocimiento ambiental en la costa de Quintana Roo: una caracterización a través de encuestas. *Investigaciones Geográficas*. (52): p. 99-116.
- Pérez C., (2008). Claves para dirigir en tiempos de crisis Liderazgo bajo presión. Serviprensa editorial. Pp:210. Guatemala. [https://www.kas.de/c/document\\_library/get\\_file?groupId=252038&uuid=be182240-dc3a-569a-40ed-cc94493d0715](https://www.kas.de/c/document_library/get_file?groupId=252038&uuid=be182240-dc3a-569a-40ed-cc94493d0715).
- Rosas, M. y Tello, A. (2012). La responsabilidad social de los medios de comunicación ante los riesgos de la zona conurbada de Tampico. *Revista Razón y Palabra*, 6.
- Salazar G., Ortiz C. y Suing A. (2016). Fenómeno de El Niño en Ecuador: su impacto en televisión y redes sociales. *Revista de Estudios para el Desarrollo Social de la Comunicación*. 13, 196- 215.
- Saleem, V. (2015, junio 07). How people turn to social media during natural disasters. Obtenido del sitio <http://www.downtoearth.org.in>.
- Sherman-Morris, K., Antonelli, K., and Williams C. (2015). Measuring the Effectiveness of the Graphical Communication of Hurricane Storm Surge Threat. *Weather, Climate, and Society - American Meteorological Society*. 7, 69-82, doi: 10.1175/WCAS-D-13-00073.1.
- Sterman, J. (2008). Risk Communication On Climate: Mental Models and Mass Balance. *Science* 322:532-533.
- UNESCO (2018). XXV Cátedra Unesco de Comunicación. Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá. Comunicación, información y lenguajes de la memoria. Pp:40. <https://www.javeriana.edu.co/unesco/pdf/XXVCatedraUnescodocumentofinal.pdf>.

- UNESCO, (2014). Manual de Gestión de Riesgo de Desastre para Comunicadores Sociales. Obtenido del sitio web de documentos oficiales: <http://unesdoc.unesco.org/images/0021/002191/219184s.pdf>.
- Velev, D., & Zlateva, P. (2012). Use of social media in natural disaster management. International Conference on Innovation, trade and economics, ICITE. 42.
- Villalobos, M. (1998). Uso de los medios de comunicación en la prevención de desastres, DIRDN. 6.



# 12

## **Conmemoración de catástrofes: acciones monumentales posdesastre ante fenómenos hidrometeorológicos extremos**

*Frausto-Martínez, Oscar*

Universidad Autónoma del Estado de Quintana Roo, Cozumel, México, ofrausto@uqroo.edu.mx, ORCID: 0000-0003-3064-6745

*Martínez - Méndez, Anita*

Instituto Tecnológico de Chetumal, Chetumal, México, amm100983@gmail.com, ORCID: 0009-0009-1146-2124

*Salinas - Vargas, Adolfo*

Universidad Autónoma de Guerrero, Taxco, México, adolfova9904@gmail.com, ORCID: 0009-0001-9652-6925

*Aguilar - Becerra, Cesar Daniel*

Universidad Autónoma de Guerrero, Acapulco, México, caguilar@uagro.mx, ORCID: 0000-0002-9973-3479

Citar este capítulo: Frausto-Martínez, O., Martínez-Méndez, A., Salinas - Vargas, A. y Aguilar - Becerra, C. D. (2024). Conmemoración de catástrofes: acciones posdesastre ante fenómenos hidrometeorológicos extremos. En: Frausto Martínez, O., Pérez Gutiérrez, R., Morales-Hernández, J. C. (Coordinadores). Curva de aprendizaje en la gestión multidimensional del riesgo. Universidad Autónoma de Guerrero - REDESClim, México. Pp: 207 - 222.

### **Resumen:**

Los monumentos conmemorativos a desastres se inscriben dentro de las acciones de remembranza posdesastre. Estos monumentos (placas, esculturas, testigos, plazas, parques, museos, fuentes y ceremonias) se promueven de manera individual o colectiva por las víctimas, directas o indirectas, así como por liderazgos autónomos o grupales. A través de la revisión de las acciones de memorialización de los huracanes Janet (Chetumal), Gilberto (Monterrey), Paulina (Acapulco), Wilma (Cancún) y Manuel (La Pintada - Guerrero) se analiza la función de los memoriales como creación de espacios públicos (físico, jurídico, institucional, virtual, entre otros) que son propicios para tomar acciones con el fin de evitar que la tragedia conmemorada se repita. Así, la conmemoración de las catástrofes se enmarca dentro de la temporalidad del desastre (después) y la gestión del riesgo (capacidad de adaptación, respuesta, retorno a la normalidad, recuperación y resistencia),

pero también de la reivindicación de asuntos clave no resueltos (reconocimiento, responsabilidad, exclusiones, incisiones y lucha de derechos).

Palabras clave: Resiliencia, gestión de riesgo, creación de desastre.

Línea temática: Políticas públicas y estrategia de comunicación.

## Introducción

Los desastres tienen un impacto en las personas y en las comunidades afectadas. Como parte significativa en la gestión del riesgo de desastres, se hace importante recordarlas y aprender de ellas para ayudar a prevenir futuros desastres y reducir el riesgo a situaciones similares (Simpson y De Alwis, 2008). Muchas comunidades en el mundo realizan ceremonias y eventos conmemorativos de desastres, como terremotos, tsunamis, huracanes, inundaciones y sequías, entre otros. Los monumentos conmemoran a una persona o un evento histórico y, en relación a la muerte o daño, los monumentos son construcciones físicas en tributo u honor a los fallecidos o heridos, también se erigen para inmortalizar un momento crítico en la historia (Bryant y Peck, 2009).

La conmemoración de los desastres puede variar según la cultura, religión, y el tipo de evento: ceremonias o eventos religiosos en lo que se pide por las víctimas o familiares; minutos de silencio en los que se recuerda a las víctimas y se honra su memoria; colocación de velas, flores, fotografías y otros atributos en memoria de los fallecidos; publicación de libros, películas o documentales que cuentan la historia del desastre y honran a las víctimas y sobrevivientes; monumentos y memoriales permanentes erigidos en el lugar del desastre o en otros lugares significativos. Para Eyre (1999), las conmemoraciones son formas simbólicas de expresión ritual que muestran el impacto de la tragedia, en especial, los eventos repentinos e inesperados en las comunidades.

Los monumentos construidos después de un desastre toman muchas formas y son recordatorios físicos para recordar para siempre desastres particulares y su legado. El análisis de estos monumentos refleja la planificación y organización de la conmemoración, donde algunas de las preguntas clave, según Eyre (1999), se orientan en: ¿qué forma puede y debe tomar un monumento permanente? ¿Cómo se mantendrán los monumentos a largo plazo? ¿Quién debe tomar estas decisiones? Además, en una perspectiva temporal, los monumentos nos ayudan a entender sus significados a largo plazo de algunos desastres al examinar temas y expresiones que rodean la conmemoración a cinco, diez o más años. También, pueden ser sitios políticos de consenso, conflicto o demandas de asuntos pendientes.

El panorama posterior al desastre está repleto de memoriales que ayudan a las comunidades a recordar colectivamente los eventos destructivos y recuperarse psicológicamente. Aunque la conmemoración es intrínseca a todas las etapas de la recuperación, poca investigación del campo de la ciencia de desastres involucra contextos conmemorativos de los desastres. A través del análisis de los discursos, Zavar y Schumann (2019), revelan que los desastres catalizan recuerdos que rehacen lugares, los textos conmemorativos posteriores a los desastres construyen una amplia gama de grados de intimidad, y los memoriales que destilan recuerdos de sobrevivientes impulsan la recuperación de la comunidad de manera diferente a los memoriales que reconstruyen pasados imaginarios.

Finalmente, en el estudio de la gestión del riesgo de desastre, los memoriales pueden vincularse con procesos de resiliencia, que se manifiestan como un componente importante de la toma de decisiones de los individuos con respecto a los recursos y la información, la prestación de asistencia, la preocupación por el bienestar de los demás y el grado en que los individuos brindan información como medio para ayudar a otros en una crisis (Madsen y O'Mullan, 2016; Xie *et al.*, 2022), dando por resultado patrones sistemáticos de la memoria en el proceso de recuperación a largo plazo (Zavar y Schumann, 2019) y que son acciones proactivas que pueden ayudar a disminuir el riesgo de desastre, construyendo capacidades para el manejo de desastres y riesgos hidrometeorológicos (UNESCO, 2023).

Estos patrones identificados en la conmemoración posterior al desastre permiten una mayor exploración sistemática del trabajo de la memoria en el proceso de recuperación a largo plazo de un desastre. A raíz de estos elementos, este trabajo busca analizar, a través de la revisión de las acciones de memorialización de los huracanes Janet (Chetumal), Gilberto (Monterrey), Paulina (Acapulco), Wilma (Cancún) y Manuel (La Pintada - Guerrero), la función de los memoriales como creación de espacios públicos (físico, jurídico, institucional, virtual, entre otros) que son propicios para tomar acciones con el fin de evitar que la tragedia conmemorada se repita. Por lo que, la conmemoración de las catástrofes se enmarca dentro de la temporalidad del desastre (después) y la gestión del riesgo (capacidad de adaptación, respuesta, retorno a la normalidad, recuperación y resistencia), pero también de la reivindicación de asuntos clave no resueltos (reconocimiento, responsabilidad, exclusiones, incisiones y lucha de derechos).

La importancia de esta revisión se fundamenta en que los monumentos conmemorativos a desastres se inscriben dentro de las acciones de remembranza posdesastre. Estos monumentos tangibles (placas, esculturas, testigos, plazas, parques, museos, fuentes y ceremonias) se promueven de manera individual o colectiva por las víctimas, directas o indirectas, así como por liderazgos autónomos o grupales.

## Antecedentes

En la experiencia colectiva de las catástrofes y desastres, las sociedades desarrollan diversos modos de duelo y recuerdo de los eventos y sus víctimas. Estos modos son tanto tangibles (monumentos, jardines, museos y archivos) como intangibles (ceremonias, rituales, narraciones, historias orales) (Simpson y De Alwis, 2008). Una forma común consiste en la construcción de monumentos conmemorativos que ayudan a las comunidades a recordar colectivamente los eventos destructivos y recuperarse psicológicamente y donde los dolientes, sobrevivientes, políticos, líderes religiosos y otros visitantes puedan procesar sus penas, presentar sus respetos a los muertos, expresar su solidaridad con la comunidad afectada y recordar la tragedia (Zavar y Schumann, 2019).

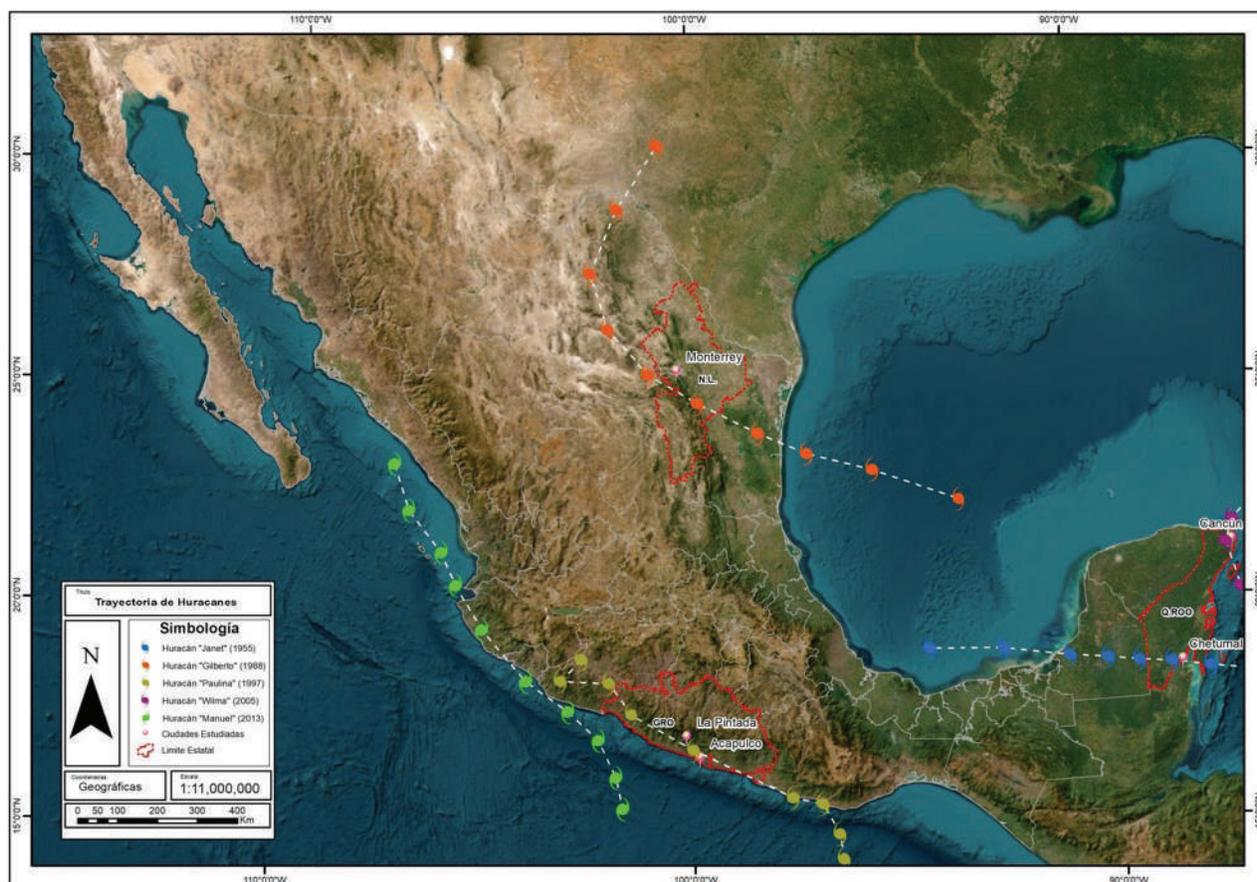
Para Zavar y Schumann (2019), una de las respuestas de emergencia examinadas es la forma en que los grupos de personas conmemoran los desastres y desarrollan diversos modos de duelo y recuerdo de los desastres y sus víctimas. Además, la conmemoración del aniversario del desastre destaca un proceso de interacción donde las personas comparten experiencias personales y el recuerdo colectivo, con el fin de reintegrarse al tiempo pre-desastre (Neal, 2013). Sin embargo, las discusiones sobre los procesos de resiliencia social aún no están completamente desarrolladas, especialmente con respecto a cómo la "memoria" incorporada de una comunidad local ayuda a dar forma a los caminos de la resiliencia (memoria social) que fundamenten los procesos de aprendizaje social para dar forma a la resiliencia y /vulnerabilidad comunitaria (Wilson, 2015).

### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### Eventos catastróficos a revisar

Para el estudio de los monumentos y memoriales se revisaron los siguientes eventos de huracanes: Janet (Chetumal), Gilberto (Monterrey), Paulina (Acapulco), Wilma (Cancún) y Manuel (La Pintada - Guerrero) (ver Figura 1).

**Figura 1.** Trayectoria de huracanes seleccionados para el análisis de los monumentos y memoriales Tomado de: NOA (2023).



## Métodos

Por medio de visitas a los sitios memoriales y un análisis de contenido de los elementos descriptivos se develan las funciones de los memoriales como creación de espacios públicos (físico, jurídico, institucional, virtual, entre otros) que son propicios para tomar acciones con el fin de evitar que la tragedia conmemorada se repita, revisando los componentes de la memoria social y colectiva considerando los modos tangibles de la conmemoración (Simpson y De Alwis, 2008), la forma, expresión de los monumentos (Zavar y Schumann, 2019) y su interacción con las personas (Neal, 2013), con el fin de construir elementos que permitan reconocer la resiliencia y la vulnerabilidad comunitaria ante desastres (Wilson, 2015).

## Resultados

Los eventos catastróficos que se revisaron están vinculados a los fenómenos hidrometeorológicos asociados a los huracanes: vientos, las inundaciones, los deslaves

y las marejadas de tormenta. La Tabla 1, muestra el evento, año de ocurrencia, el sitio de análisis, el evento asociado principal, el tipo de memorial (Plaza, monumento, escultura, placa), nombre del memorial y fecha de construcción.

**Tabla 1. Lista de los eventos analizados para este estudio.**

Evento	Año	Sitio analizado	Evento principal	Evento Asociado	Tipo de memorial(s)	Nombre del memorial	Fecha de colocación del monumento
Janet	1955	Chetumal	Inundación	Huracán	Plaza, placas, monumento Panteón, casa de la crónica, marca	Parque del renacimiento	1998
Gilberto	1988	Monterrey	Inundación	Huracán	Monumento, Placa	La flama solidaria	1989 - 1999
Paulina	1997	Acapulco	Inundación - Deslaves	Huracán	Placa - Monumento - panteón	Plaza de La Esperanza Monumento en fosa común	2003
Wilma	2005	Cancún	Inundación y vientos	Huracán	Escultura - placa	Escultura	2020
Manuel	2013	La Pintada	Derrumbe	Huracán	Plaza - placa-escultura y jardín	Parque de los naranjos	2014

**Fuente:** Elaboración propia.

Los fenómenos hidrometeorológicos que se describen en la tabla 1 muestran un periodo de eventos de 58 años, dos en Guerrero, dos en Quintana Roo y uno en Nuevo León.

Huracán Janet: impactó la zona de la frontera entre México y Belice los días 27 y 28 de septiembre de 1955, siguiendo su travesía por la Península de Yucatán y Veracruz, que provocó inundaciones, destrucción de localidades y pueblos (Rodríguez, 2019; Rodríguez, 2022; Xacur-Maiza, 2005), con una velocidad de vientos máximos de 277.8 km/h y una presión mínima de 914 mb (Sánchez *et al.*, 2021). Para ese entonces, la ciudad de Chetumal tenía 50 años de haberse fundado, aunque ya se tenía registro del paso de algunos ciclones, como el ciclón Belice de 1936 (Frausto-Martínez, 2018). Las afectaciones fueron de alto impacto: más de 80 muertos y 300 desaparecidos, y hubo que trasladar a la población a ciudades vecinas (Pacheco Cruz, 1999; Rodríguez, 2019).

Huracán Gilberto: la zona nororiente de México, en específico, la ciudad de Monterrey fue impactada por el huracán el día 16 y 17 de septiembre de 1988 (la última referencia era el

paso del huracán Beulah, en 1967); con vientos máximos de 298 km/h y con inundaciones súbitas en el río Santa Catarina, con más de 300 muertos no identificados y sepultados en la fosa común de varios panteones municipales (González, 2013).

Huracán Paulina: Con un registro extraordinario de precipitación de 411.6 mm en 24 horas y lluvias súbitas en Acapulco de 120 mm en una hora, impactando la región entre los días 5 - 10 de octubre de 1997 (Villegas-Romero *et al.*, 2009), provocando inundaciones, escurrimientos súbitos, derrumbes y flujos de lodo a lo largo de las cuencas de los ríos Papagayo y La Sabana). La referencia próxima del impacto de un huracán de esa magnitud era de 23 años, cuando el huracán Madeline afectó el puerto con afectaciones sin precedentes.

Huracán Wilma: El año 2005 representó un hito en el desarrollo de huracanes en el Atlántico (y que no se repetiría hasta el año 2020), donde los ciclones Stan, Rita, Katrina, Emili y Wilma fueron devastadores y con categorías superiores a cuatro en la escala Saffir-Simpson (Sánchez *et al.*, 2021). El huracán Wilma impactó la zona norte de Quintana Roo entre los días 21 y 23 de octubre. Donde las precipitaciones extremas, los vientos, la marejada de tormenta y las inundaciones afectaron a más del 70% de la población del estado de Quintana Roo (Frausto-Martínez, 2014; Ihl, 2008).

Huracán Manuel: La zona montañosa de Guerrero fue impactada por el meteoro entre los días 10 y 18 de septiembre, con precipitaciones extraordinarias que superaron los 1000 mm en ese lapso de tiempo. Se tiene referencia de las afectaciones de los huracanes Katrina (1967) y Paulina (1997) (Toscana y Villaseñor, 2018). En específico, para la localidad de La Pintada, la precipitación se estimó entre 200 y 700 mm para un periodo entre el 11 y 15 de septiembre y, posteriormente, el 16 de septiembre, se genera el deslizamiento de tierra donde pierden la vida 71 personas, ocho desaparecidos, ocho heridos y cientos de damnificados (Alcántara-Ayala *et al.*, 2017; SEDATU, 2014).

## Monumentos tangibles conmemorativos

La ciudad es Chetumal, en Quintana Roo, es un ejemplo de la integración del discurso histórico del desastre en la vida pública y en los elementos urbanos. Del parque Renacimiento, pasando por la "casa voladora" o la visita obligada a la sección de "Janet" en "La Casa de la crónica" y hasta la ceremonia anual, del 27 de septiembre, conmemorativa del huracán Janet en el panteón Municipal. La escultura central del parque Renacimiento conmemora los 100 años de la ciudad y el recuerdo del impacto del huracán. La escultura es obra de Rosa María Ponzanelli (Figura 2).

**Figura 2.** Parque y escultura Renacimiento en la Ciudad de Chetumal, México (Fotografía propia).



Otros elementos complementarios de la remembranza del huracán Janet se observa en los monumentos complementarios como las placas que señalan el nivel de inundación o las descriptivas en el marco de las vivencias extraordinarias durante el evento, como es el caso de la “Casa Voladora” (Figura 3). Una descripción detallada de este evento se puede leer en: Frausto-Martínez (2018). Finalmente, en el panteón municipal existe la sección de referencia de la fosa común y la referencia en sepulturas sobre las muertes vinculadas al huracán (Figura 4).

**Figura 3.** Placas del nivel de la inundación y “La Casa Voladora”, memoriales del Huracán Janer de 1955 en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. (Fotografías propias).



**Figura 4.** Monumento en el panteón municipal de Othon P. Blanco, placa conmemorativa y sepultura de referencia a las víctimas del huracán Janet de 1955. (Fotografías propias).



Los monumentos tangibles fuentes, esculturas y plazas será un constante en la remembranza de los desastres analizados. Así, para el huracán Gilberto, se utilizó la escultura de “La flama Solidaría” como tributo a las los que perecieron y a la solidaridad de los habitantes de Monterrey. La escultura es de Leonardo Nierman y su diseño data de 1982 y la placa conmemorativa es de 1989, un año posterior al evento (Figura

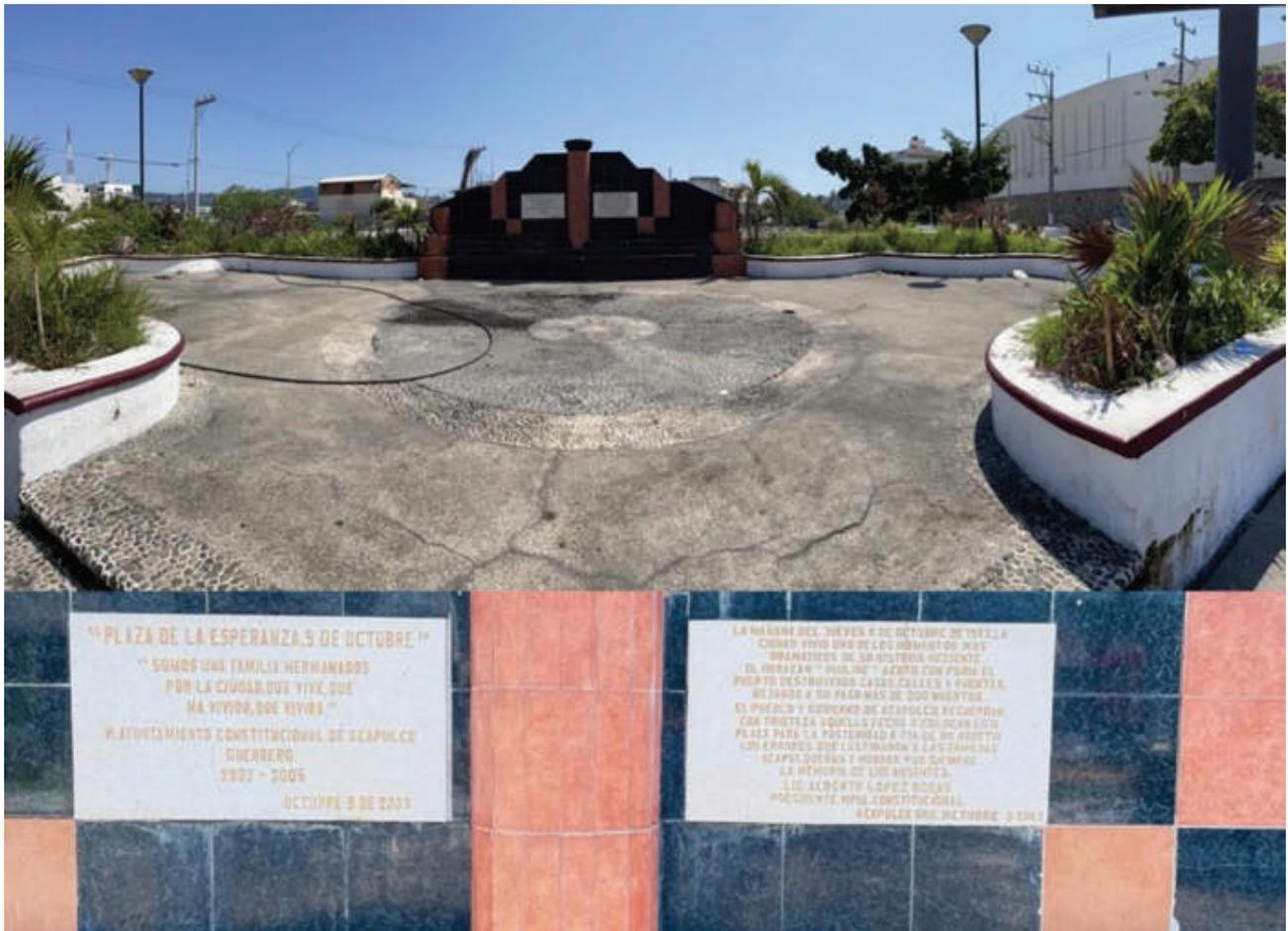
5). Conjuntamente, la Policía judicial de Nuevo León, erigió un memorial en la avenida Morones Prieto, en alusión a las víctimas de la corporación que fallecieron durante las acciones de rescate y salvamento durante la crecida del río Santa Catarina (Figura 4), denotando la particularidad de los memoriales, como lo señala Xie *et al.* (2022), donde se manifiesta un componente importante de la prestación de asistencia, la preocupación por el bienestar de los demás y el grado en que los individuos ayudaron a otros en un momento de crisis (Figura 4).

**Figura 5. La flama Solidaria y memorial de la policía judicial, en Monterrey, Nuevo León (Fuente: Erik Solheim Rocha).**



Para el caso del huracán Paulina de 1997, se construyó “La plaza de la Esperanza 9 de octubre”, inaugurada en octubre de 2003. Es un memorial a las más de 200 víctimas mortales, principalmente por la crecida del río La Sabana y Papagayo y los derrumbes en las cabeceras altas de estas cuencas. En específico, la placa conmemorativa señala los daños, los “errores” y la remembranza (Figura 6). Conjuntamente, en el panteón municipal de Las Cruces, se construyó el monumento de 3.5 m<sup>2</sup> a las víctimas desconocidas (aproximadamente 60 personas) (Figura 7).

**Figura 6.** Plaza de la esperanza 9 de octubre, Acapulco, Guerrero. (Fotografías propias).



**Figura 7.** Monumento a las víctimas desconocidas del huracán Paulina, panteón Las Cruces, Acapulco, Guerrero. (Fotografías propias).



Las afectaciones materiales del huracán Wilma de 2005 fueron sorprendentes, lo cual contrasta con la dimensión del monumento, cuya escultura se ubica en “El Crucero”, sitio conmemorativo de la fundación de Cancún. Si bien, al pie de la escultura se gravó el nombre del huracán, en las placas aledañas no existe referencia a la magnitud del evento, daños o significado de la escultura que se erigió en el año 2020 a raíz de la remodelación de las avenidas principales de la ciudad (Figura 8).

**Figura 8. Escultura del huracán Wilma en la Plaza El Crucero, en Cancún, Quintana Roo. (Fotografías propias).**



Finalmente, el desastre de La Pintada del año 2013. Es un evento extraordinario, donde la reubicación de la población, la construcción de nuevas casas y la cobertura mediática del desastre se hicieron evidentes. El programa Reconstrucción de Guerrero y, en específico Reconstrucción La Pintada, donde los programas de desarrollo de zonas prioritarias y el Fondo Nacional de Habitaciones Populares (Gobierno de México, 2014). Se instaló un comité para la Reconstrucción, cuyo presidente fue el comisario ejidal. En el lugar, se construyó un parque, iglesia, un comedor popular, casas y un refugio, además de caminos y escuelas (Figura 9). Resalta el parque de los naranjos, donde se plantó un árbol por cada una de las víctimas fatales del deslave el cual quedó concluido en el 26 de mayo de 2014 (Ver Figura 10).

**Figura 9. Parque de los naranjos, placas conmemorativas y plaza general La Pintada (Fotografías de dominio público).**



**Figura 10.** Parque Los Naranjos, La Pintada, Guerrero.  
(Foto: Gobierno de México, 2014).



## Consideraciones finales

Las diversas formas de duelo después de un desastre se pueden manifestar de manera tangible o intangible. En este caso, en este escrito se exploraron algunas manifestaciones tangibles de memorización, remembranza y conmemoración para con las víctimas y dolientes por fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Se presenta una aproximación a la construcción de monumentos, plazas, parques, esculturas y placas que ayudan a las comunidades a recordar colectivamente estos eventos destructivos, donde el respeto, la solidaridad y la remembranza son los ejes fundamentales de estas acciones.

Los casos tratados en este escrito (Chetumal, Monterrey, Cancún, Acapulco y La Pintada) muestran procesos de interacción social, donde el recuerdo colectivo será fundamental para entender la vulnerabilidad y la capacidad adaptativa. En específico, se reconoce el caso del huracán Janet y el colectivo social y monumental de la Ciudad de Chetumal,

Quintana Roo, el cual puede ayudar a develar el proceso de entendimiento de la resiliencia comunitaria y la memoria social de los desastres.

## Referencias

- Alcántara-Ayala, I., Garnica-Peña, R. J., Domínguez-Morales, L., González-Huesca, A. E., y Calderón-Vega, A. (2017). The La Pintada landslide, Guerrero, Mexico: hints from the Pre-Classic to the disasters of modern times. *Landslides*, 14(3), 1195-1205. <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0808-9>
- Bryant, C., y Peck, D. (2009). *Encyclopedia of Death and the Human Experience* <https://doi.org/10.4135/9781412972031>
- Cárdenas, E. (mayo, 2008). La percepción social del riesgo, lo contingente y lo indeterminado: el caso de los huracanes y suicidios en Quintana Roo. En X Coloquio Internacional de Geocrítica. Universidad de Barcelona, Barcelona. Recuperado de <http://www.ub.edu/geocrit/-xcol/88.html>, consultado: 29/05/2023
- Elyse M. Zavar & Ronald L. Schumann (2019) Patterns of disaster commemoration in long term recovery, *Geographical Review*, 109:2, 157-179, DOI: 10.1111/gere.12316
- Eyre, A. (1999). In remembrance: post-disaster rituals and symbols. *Australian Journal of Emergency Management, The*, 14(3), 23-29. <https://search.informit.org/doi/abs/10.3316/ielapa.392074388428210>
- Frausto-Martínez, O. (2014). *Monitoreo de riesgo y desastre asociados a fenómenos hidrometeorológicos y cambio climático*.
- Frausto-Martínez, O. (2018). Turismo oscuro: el desastre del huracán Janet de 1955 en la ciudad de Chetumal, México. *Revista Teoría y Praxis*, 24, 175-196. <http://repobiblio.cuc.uqroo.mx/handle/20.500.12249/1322>
- Gob.mx (2013). Se tiene fondo de 228 millones para la reconstrucción de Guerrero. Secretaría de gobernación de México. <https://www.gob.mx/bienestar/prensa/se-tiene-fondo-de-228-millones-para-la-reconstruccion-de-guerrero>, consultado: 30/05/2023
- Gobierno de México. (2014). *Primera etapa de entrega de viviendas. La Pintada de Atoyac de Álvarez, Guerrero*. Recuperado de <https://www.gob.mx/eptn/galerias/primera-etapa-de-entrega-de-viviendas-la-pintada-de-atoyac-de-alvarez-guerrero-11537#carousel-custom>
- González, Soto. S. (2013). *Sobrevivientes del Huracán Gilberto*. Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Ihl, T. (2008). The risk of hurricane impacts in northern Quintana Roo. In A. Palafox Muñoz y O. Frausto Martínez (Eds.), *Turismo: desastres naturales, Sociedad y medio ambiente* (pp. 25-33). Plaza y Valdés.
- Madsen, W., y O'Mullan, C. (2016). Perceptions of community resilience after natural disaster in a rural Australian town. *Journal of Community Psychology*, 44(3), 277-292. <https://doi.org/10.1002/jcop.21764>

- Neal, D. M. (2013). Social Time and Disaster. *International Journal of Mass Emergencies & Disasters*, 31(2), 247-270. <https://doi.org/10.1177/028072701303100207>
- NOAA. (2023). *Trayectoria de huracanes*. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.noaa.gov/>
- Pacheco Cruz, S. (1999). *Janet o la tragedia de Chetumal*. Editora Norte Sur.
- Rodríguez, A. M. N. (2019). El huracán Janet y el desastre de 1955 en Quintana Roo: estudio de una coyuntura crítica. *Antrópica. Revista de Ciencias Sociales y Humanidades*, 5(10), 161-190. <https://antropica.com.mx/ojs2/index.php/AntropicaRCSH/article/view/196>
- Rodríguez, A. S. (2022). Quintana Roo y el huracán Janet. In S. Gonzáles Soto (Ed.), *Historia y memoria de los huracanes y otros episodios hidrometeorológicos extremos en México* (pp. 303-372). Universidad Veracruzana, Universidad de Colima y CIESAS.
- Sánchez, R., G., Frausto-Martínez, O., y Cervantes, A. (2021). Análisis histórico (1851-2019) de huracanes extremos en Quintana Roo. In J. C. Morales Hernández, E. González Sosa, C. M. Welsh Rodríguez, y O. Frausto Martínez (Eds.), *Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos* (pp. 223-249). Universidad de Guadalajara - REDESCLIM.
- SEDATU. (2014). *El presidente Enrique Peña Nieto inaugura obras de reconstrucción en La Pintada, Guerrero*. Recuperado de <https://www.gob.mx/sedatu/prensa/el-presidente-enrique-pena-nieto-inaugura-obras-de-reconstruccion-en-la-pintada-guerrero-5652>
- Simpson, E., y De Alwis, M. (2008). Remembering natural disaster: Politics and culture of memorials in Gujarat and Sri Lanka. 24(4), 6-12. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8322.2008.00599.x>
- Toscana, A. A., y Villaseñor, F. A. (2018). Las tormentas Ingrid y Manuel en La Montaña de Guerrero, 2013. La atención de la emergencia. *Sociedad y ambiente*(16), 59-89.
- UNESCO. (2023). *Disaster-risk-reduction*. <https://www.unesco.org/en/days/disaster-risk-reduction>
- Villegas-Romero, I., Oropeza-Mota, J. L., Martínez-Ménes, M., y Mejía-Sáenz, E. (2009). Trayectoria y relación lluvia-escorrentamiento causados por el huracán Paulina en la cuenca del Río La Sabana, Guerrero, México. *Agrociencia*, 43(4), 345-356.
- Wilson, G. A. (2015). Community resilience and social memory. *Environmental Values*, 24(2), 227-257. <https://doi.org/10.3197/096327114X13947900182157>
- Xacur-Maiza, J. (2005). Enciclopedia de Quintana Roo: fascículo Chetumal/huracán. *México: Gobierno del estado de Quintana Roo*.
- Xie, L., Pinto, J., y Zhong, B. (2022). Building community resilience on social media to help recover from the COVID-19 pandemic. *Computers in Human Behavior*, 134, 107294. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107294>
- Zavar, E. M., y Schumann, R. L. (2019). Patterns of disaster commemoration in long-term recovery. *Geographical Review*, 109(2), 157-179. <https://doi.org/10.1111/gere.12316>

## DE LOS AUTORES

Foto	Biografía
	<p><b>Juan Manuel Rodríguez Esteves</b></p> <p>Geógrafo por la Universidad de Guadalajara, especialista en percepción remota por el Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais de Brasil, maestro en administración integral del ambiente por El Colef-CICESE y doctor en ciencias sociales con especialidad en antropología social por el CIESAS-Unidad Occidente. Miembro co-fundador de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim). Su libro más reciente es De lluvias y desastres: un modelo para manejar el riesgo en Tijuana, Baja California (El Colef, 2020). Correo electrónico es: <a href="mailto:jesteves@colef.mx">jesteves@colef.mx</a></p>
	<p><b>Bruno Trueba Cruz,</b></p> <p>Egresado de la licenciatura en Manejo Sustentable de Zonas Costeras por parte de la ENES Unidad Mérida UNAM. Su línea de investigación se encuentra enfocada en el riesgo costero, generado a partir del impacto de fenómenos hidrometeorológicos y análisis espacio-temporales de los mismos. Escuela Nacional de Estudios Superiores Unidad Mérida, UNAM, Ucu, Yucatán, México, <a href="mailto:316022657@enesmerida.unam.mx">316022657@enesmerida.unam.mx</a>, ORCID: 0009-0001-1121-5862</p>
	<p><b>David Romero</b></p> <p>Es profesor asociado en Geografía física de la ENES Unidad Mérida. Estudió la Licenciatura y Maestría en Geografía en la Universidad de Limoges, Francia y el Doctorado en la misma disciplina en la UNAM.</p> <p>Es especializado en geografía climática y climatología con particular interés en el análisis espacio-temporal de los externos hidro-climatológicos o meteorológicos como son las sequías y los ciclones tropicales para la evaluación del riesgo correspondiente considerando las oscilaciones naturales y el cambio climático.</p>



### **Christian Domínguez Sarmiento**

La Dra. Christian Domínguez Sarmiento es licenciada en Ciencias Atmosféricas por la Universidad Veracruzana. Obtuvo su maestría y doctorado en Ciencias de la Tierra, posgrado ofertado por la UNAM. Actualmente, es investigadora titular del Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático. Ha impartido clases en la Facultad de Ciencias, la Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra y en el posgrado de Ciencias de la Tierra de la UNAM. Sus líneas de investigación son la meteorología tropical, la modelación climática y los riesgos hidrometeorológicos.



### **Antonio Luna Díaz Peón**

12 de noviembre de 1972 en Xalapa, Veracruz. Licenciatura en Ciencias Atmosféricas (1993-1998), Especialidad y Maestría en Estadística Aplicada (2004-2007) en la Universidad Veracruzana. Doctorado en Desarrollo Regional Sustentable por El Colegio de Veracruz (2016-2019); Doctor Honoris Causa por sus contribuciones al desarrollo de las ciencias climáticas del estado de Veracruz, acta con valor internacional del Centro de Capacitación y Certificación Científico Tecnológico Laboral. Septiembre 2020. Premio nacional de periodismo 2021.



### **Jimena Astrid Mantilla Díaz**

12 de julio de 2000 en Xalapa, Veracruz. Licenciatura en Biología (2018-2023) en la Universidad Veracruzana. Estudiante de doctorado en Ecología y Gestión Ambiental en el Centro Universitario Bonpland y Humboldt.



### **Ignacio Garay Peralta**

18 de julio de 1983, en Plan del Río, Veracruz. Licenciatura en Ingeniería en Agronomía por el Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván (2001-2006). Maestría en Agricultura Orgánica Sustentable (2006-2008) por la Facultad de Agricultura y Zootecnia del Estado de Durango. Candidato a Doctor en Ecología y Gestión Ambiental, por el centro Universitario Bonpland y Humboldt (2020-2022). Perfil Prodep desde el 2014 y miembro del Sistema Estatal de Investigadores de Veracruz (2023). Docente-Investigador del Tecnológico Nacional de México Campus Úrsulo Galván.



### Christoph Neger

El Dr. Christoph Neger es egresado de la maestría en Desarrollo Urbano y Regional Sustentable de la Universidad de Graz, Austria, y el doctorado en Geografía de la UNAM. Desde el 2020 trabaja como Investigador Asociado “C” de Tiempo Completo en el Departamento de Geografía Social del Instituto de Geografía de la UNAM. Es Investigador Nacional Nivel 1. Su investigación se enfoca en la gobernanza del riesgo de los incendios forestales y el manejo integrado del fuego.



### José Francisco León Cruz

El Dr. José Francisco León Cruz realizó su maestría y doctorado en Geociencias Aplicadas en el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica (IPICYT). Desde el 2020 es Investigador Asociado “C” de Tiempo Completo en el Departamento de Geografía Física del Instituto de Geografía de la UNAM. Es Investigador Nacional Nivel 1 y miembro del Comité Técnico Académico la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESCLIM – CONAHICYT).



### Christian Adrián Álvarez Báez

Doctor en Geociencias Aplicadas. Actualmente pertenece al Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores nivel candidato y está principalmente enfocado en el estudio del impacto ambiental en áreas urbanas por causa de tormentas de polvo empleando técnicas de simulación numérica, percepción remota y machine learning. Su investigación ha abarcado temas como la desertificación eólica, la dinámica atmosférica, la interacción océano-atmósfera y la deposición de polvo mineral durante las tormentas de polvo.



### María de Jesús Guevara Macías

Doctora en Geociencias Aplicadas por el Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. Actualmente se desempeña como docente en el sector privado. Es Candidata a Investigador del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII). Las principales líneas de investigación son cambios de uso de suelo, climatología urbana, riesgos asociados a fenómenos hidrometeorológicos.



### Jonathan Ernesto Rivera García

Ingeniero Ambiental y estudiante de la Maestría en Ciencias en Geofísica del Centro Universitario de la Costa. Universidad de Guadalajara. Autor y coautor de artículos y capítulos de libro relacionados con procesos de remoción en masa y vulnerabilidad hídrica. jonatan.rivera7773@alumnos.udg.mx



### Julio Cesar Morales Hernández

Ecólogo Marino egresado de la Universidad Autónoma de Guerrero y Dr. en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas, grado obtenido en la Universidad de Guadalajara. Actualmente Profesor Investigador del Centro Universitario de la Costa de la Universidad de Guadalajara en temas relacionados con eventos hidrometeorológicos y sus efectos en zonas costeras atendiendo las líneas de investigación en el Centro de Estudios Meteorológicos de la Costa. Miembro de Comité Técnico Académico de REDESCLIM y miembro del Sistema Nacional de Investigadores. julio.morales@academicos.udg.mx



### Fátima Maciel Carrillo González

Egresada de la licenciatura de Física de la Universidad de Guadalajara, Maestra en Oceanografía física en el CICESE y el doctorado en Ingeniería y Tecnología por la misma UdeG. Desde el 2004 trabajo como profesora investigadora en el Universidad de Guadalajara, en el Centro Universitario de la Costa, liderado trabajo de monitoreo atmosféricos con temas de investigación, estudios y formación de recursos humanos en temas de meteorología, climatología y oceanografía costera



### Jorge Téllez López

Dr. en Ciencias Biológicas, Profesor Investigador del Centro Universitario de la Costa de la Universidad de Guadalajara y Miembro del Sistema Nacional de Investigadores del Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnología (CONAHCYT). jorge.tlopez@academicos.udg.mx



### **Bartolo Cruz Romero**

Biólogo egresado del Instituto Tecnológico del Mar No.6, Maestro en Ciencias para el Desarrollo, la Sustentabilidad y el Turismo y Dr. en Ciencias en Biosistemática, Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas, grados obtenidos en la Universidad de Guadalajara. Actualmente Profesor Investigador del Centro Universitario de la Costa de la Universidad de Guadalajara en temas relacionados con la caracterización del territorio y atendiendo las líneas de investigación en Paisaje y Sociedad en el Laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad. bartolo.cruz@academicos.udg.mx



### **Dennis Sánchez Casanova**

Licenciado en Biología y egresado de la maestría en Ciencias en Geofísica de la Universidad de Guadalajara. Estancias de investigación en la Universidad Autónoma de Quintana Roo y CONICET, Mendoza, Argentina. Autor y coautor de capítulos de libro nacionales e internacionales, relacionados a temas de Degradación de Tierras, Hidrología y Riesgos Ambientales.



### **Paola Patricia Jiménez Martínez**

Ingeniera Química con Maestría en Ingeniería Aplicada con Orientación en Recursos Hidráulicos; especialista en Modelos Hidrológicos e Inundaciones para el Análisis de Riesgos, participante en el desarrollo del Atlas de Peligros Hidrometeorológicos del Estado de Zacatecas analizando y caracterizando alrededor de 4,500 localidades y 62 zonas urbanas del Estado de Zacatecas. Docente de Educación Media Superior, además de trabajar en áreas administrativas en Gobierno del Estado de Zacatecas. Universidad Autónoma de Zacatecas, Zacatecas, México, jmzzac2405@gmail.com, ORCID:0009-0003-0756-2735



### **Oscar Antonio Dzul García**

Es docente-investigador en la Maestría en Ingeniería Aplicada con orientación en Recursos Hidráulicos de la Universidad Autónoma de Zacatecas, México. Es Ingeniero Civil y cuenta con una Maestría en Ingeniería Hidráulica de la UNAM. Su experiencia abarca procesos de modelación numérica y computacional de procesos hidrológicos e hidráulicos en cuencas y zonas urbanas, análisis de peligros hidrometeorológicos, eventos extremos y cambio climático. Desarrolla proyectos de vinculación y gestión con dependencias gubernamentales y sector productivo.



### Luis Felipe Pineda-Martínez

Doctor en Geociencias Aplicadas y actualmente Docente-Investigador de la Unidad Académica de Ciencias Sociales y de Ciencias de la Tierra de la UAZ. Pertenece a Sistema Nacional de Investigadores nivel 1 y parte del Comité Técnico Académico de la REDESClim. Sus líneas de investigación incluyen modelos atmosféricos y análisis de tendencias de cambio y variabilidad climática



### Baudelio Rodríguez-González

Doctor en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Ambiental y Desarrollo Hidráulico por la Universidad de Sonora (2017), Maestro en Planeación de Recursos Hidráulicos (2006) e Ingeniero Civil (2000) por la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Zacatecas (UAZ). Perfil PRODEP, líder del Cuerpo Académico Estudio de Hidrosistemas y Cambio Climático, miembro de la Red Mexicana de Recursos Hídricos y de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos, responsable del Programa de Ingeniero Geólogo de la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la UAZ.



### Francisco Aguilar Ortega

Es docente-investigador, del Programa de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Zacatecas. ES Ingeniero Civil, Maestro en Planeación de Recursos Hidráulicos, y Doctor en Ciencias Ambientales. Su experiencia profesional la realiza en el área de hidráulica, y ha desarrollado proyectos de investigación sobre sistemas de urbanos y agrícolas, y sustentabilidad



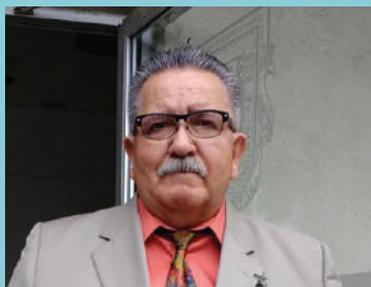
### Ena del Carmen Gámez Balmaceda

Ingeniera Civil, maestra en Ciencias de la Tierra y doctora en Medio Ambiente y Desarrollo. Realiza investigación, docencia y consultoría en Gestión de Riesgos sobre amenazas naturales y antropogénicas. Con énfasis a la aplicación de la ciencia e ingeniería a estudios de peligro sísmico, amenazas hidrometeorológicas, impacto por el cambio climático y residuos sólidos. Empezó su trabajo sobre evaluación y gestión de riesgo en 2004. Ha colaborado en proyectos académicos y de gobierno con protección civil a nivel municipal, estatal y nacional, como atlas de riesgos y cambio climático. Es investigadora posdoctoral en el CICESE y miembro del sistema nacional de investigadores.



### Zayre Ivone González Acevedo

Ingeniera química ambiental, Maestra en Ingeniería Química de Integración de Procesos, Doctora en Geoquímica Ambiental de la Universidad de Heidelberg, Alemania. Repatriada en el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares (5 años). A partir del 2012 Investigadora en la división de Ciencias de la Tierra en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California. Responsable de proyectos de investigación 2014-2021 enfocados en establecer líneas base ambientales y sociales, así como evaluar el impacto ambiental social y económico en zonas de interés geotérmico en México. Estancia sabática en la Universidad de Alberta en Canadá en 2019-2020. Nivel I en el Sistema Nacional de Investigadores.



### Marco Antonio García Zárate

De julio de 1980 a julio de 1981, Marco Antonio García Zárate se especializó en el Laboratorio de Óptica del Departamento de Física Aplicada del CICESE con una beca del CONACYT. Obtuvo el título de Ingeniero Industrial por el Instituto Tecnológico de Ensenada en 2010. Posteriormente, el Dr. García cursó la Maestría en Ciencias en Manejo de Ecosistemas de Zonas Áridas en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de Baja California, becado por el CONACYT, obteniendo Mención Honorífica en agosto de 2013. Recibió el Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo por la Universidad Autónoma de Baja California, México, en octubre de 2016, con beca CONACYT y Mención Honorífica. En febrero de 2017, fue galardonado con el Mérito Escolar por la Universidad Autónoma de Baja California. Actualmente, imparte clases a nivel licenciatura, maestría e industria, y trabaja en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, desde 1997.



### Álvaro Alberto López Lambráño,

Investigador de la Universidad Autónoma de Baja California. Se especializa en Recursos Hídricos, Cambio Climático y Saneamiento Ambiental, director del Grupo HIDRUS y miembro del Sistema Nacional de Investigadores. En el estudio de los recursos hídricos cuenta con una experiencia de 23 años y sus líneas de investigación y consultoría comprenden las siguientes temáticas: Estudios del cambio climático, modelaciones hidrológicas de cuencas hidrográficas y urbanas, modelaciones hidráulicas de flujos a superficie libre y a presión, diseño y optimización de sistemas de acueductos, alcantarillados, plantas de tratamiento de agua potable, residual y gestión integral de residuos sólidos.



### Carlos Contreras Servín

Profesor-investigador de Tiempo Completo Nivel VI (Equivalente a Titular C) del Laboratorio Nacional de Geoprosesamiento de Información Fitosanitaria-CIACyT- Universidad Autónoma de San Luis. Doctor en Geografía por la UNAM. Líneas de investigación: Cambio climático y plagas y enfermedades, climatología histórica. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Profesor de la licenciatura en Geografía y el posgrado multidisciplinario en Ciencias Ambientales de la UASLP.



### María Guadalupe Galindo Mendoza

Profesora-investigadora de Tiempo Completo Nivel VI (Equivalente a Titular C) del Laboratorio Nacional de Geoprosesamiento de Información Fitosanitaria-CIACyT- Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Doctora en Geografía por la UNAM. Líneas de investigación: Geotecnologías aplicadas a la agricultura, salud humana y fitosanidad. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores, Nivel II. Profesor de la licenciatura en Geografía, Salud Ambiental y el posgrado multidisciplinario en Ciencias Ambientales de la UASLP.



### Álvaro Gerardo Palacio Aponte

Profesor-investigador de Tiempo Completo Nivel VI en La Facultad de Ciencias Sociales y Humanidades, de La Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Doctor en Geografía Ambiental, por UNAM. Líneas de trabajo: zonificación de riesgos naturales, geomorfología ambiental y ecología del paisaje. Miembro del Sistema Nacional de Investigadores. Profesor en licenciaturas y posgrados en Ciencias Ambientales y Geografía de la UASLP y otras universidades.



### Mario Enrique García Guadalupe

Doctor en ciudad, territorio y sustentabilidad - especialidad en estudios del hábitat, planeación territorial y sustentabilidad. Maestro en Ciencias de la Tierra - especialidad en Oceanografía y Meteorología Física e Ingeniero Químico - especialidad en Tecnología de Plásticos. Actualmente es profesor titular en el Departamento de Física del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. Orcid: 0000-0003-2179-4818.



### **Héctor Hugo Ulloa Godínez**

Doctor en ciudad, territorio y sustentabilidad - especialidad en estudios del hábitat, planeación territorial y sustentabilidad. Maestro en administración con especialidad en negocios y Licenciado en administración de empresas. Actualmente es profesor titular en el Departamento de Física del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías de la Universidad de Guadalajara. Orcid: 0000-0002-1888-628X



### **Hermes Ulises Ramírez Sánchez**

Doctor en Ciencias, mención química. Geociencias del medio ambiente. Universidad de Niza-Sofia Antipolis, Francia. Maestro en Geociencias del medio ambiente. Universidad de Aix Marsella III Francia. Ingeniero químico, especialidad en polímeros. Universidad de Guadalajara. Actualmente es profesor titular en el Departamento de Física del Centro Universitario de Ciencias Exactas e Ingenierías - Universidad de Guadalajara, Jalisco, México. Orcid: 0000-0003-2975-5215.



### **Dr. Ing. geógrafo Oscar Frausto - Martínez**

Licenciado y maestro en geografía con especialidad en manejo y conservación de los recursos naturales. Doctor en análisis e investigación espacial por la Universidad Bauhaus – Alemania. Profesor investigador de la división de desarrollo sustentable de la Universidad de Quintana Roo. Es miembro del Sistema Nacional de Investigadores, miembro de la Academia de Geografía de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística y representante del CTA de la REDESCLIM del CONACYT 2021 - 2023. Sus líneas de investigación se centran en el diseño, uso y desarrollo de indicadores de sustentabilidad aplicados a diversos contextos territoriales. ofrausto@uqroo.edu.mx



### **Adolfo Salinas Vargas**

Es Licenciado en Geografía de la Escuela Superior Ciencias de la Tierra (ESCT), en la Universidad Autónoma de Guerrero (UAGro). En la actualidad colabora en distintos trabajos de investigación acerca de Geografía del Riesgo, Ecología, Monitoreo y Gestión de cuencas, entre otros.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-9652-6925>

Correo: [adolfova9904@gmail.com](mailto:adolfova9904@gmail.com)



### **Cesar Daniel Aguilar - Becerra**

Dr. En Ciencias Ambientales por la Universidad Autónoma de Guerrero. Profesor investigador de la Facultad de Turismo en la Uagro. Sus líneas de interés de centran en la sustentabilidad del turismo y en la gestión del riesgo en destinos turísticos.



### **Anita Martínez Méndez.**

Doctora en geografía por la Universidad de Quintana Roo (UQROO). Maestra en construcción y licenciada en arquitectura por el Instituto Tecnológico de Chetumal (ITCH). Investigadora Posdoctoral del CONAHCYT. Su línea de investigación: Resiliencia de la infraestructura urbana.



ISBN: 978-607-8755-64-6



OSCAR FRAUSTO - MARTÍNEZ  
ROSALVA PÉREZ GUTIÉRREZ  
JULIO CESAR MORALES HERNÁNDEZ  
**COORDINADORES**

