

Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos

Julio Cesar Morales Hernández
Enrique González Sosa
Carlos Manuel Welsh Rodríguez
Oscar Frausto Martínez



Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos

Coordinadores

Julio Cesar Morales Hernández
Enrique González Sosa
Carlos Manuel Welsh Rodríguez
Oscar Frausto Martínez





CONACYT
Registro Nacional de Instituciones
y Empresas Científicas y Tecnológicas
Registro: 1900555

Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos

© Julio Cesar Morales Hernández
© Enrique González Sosa
© Carlos Manuel Welsh Rodríguez
© Oscar Frausto Martínez

Dirección del Proyecto

Eduardo Licea Sánchez
Esther Castillo Aguilar
José Eduardo Salinas de la Luz

Arte

Paulina Cordero Mote
Vanesa Alejandra Vázquez Fuentes
Livia Rocco Sarmina

Formación de Interiores

Paulina Cordero Mote

1a. edición

© 2021 Fernando de Haro y Omar Fuentes

ISBN 978-607-437-561-9

D.R. © CLAVE Editorial

Paseo de Tamarindos 400 B, Suite 109.

Col. Bosques de las Lomas, Ciudad de México, México. C.P. 05120

Tel. 52 (55) 5258 0279/80/81

ame@ameditores.mx

ecastillo@ameditores.mx

www.ameditores.com

Las opiniones y puntos de vista expresados en la presente obra, son responsabilidad única y exclusiva de su autor y no necesariamente representan las posiciones u opiniones de la editorial, y las de sus integrantes.

Ninguna parte de este libro puede ser reproducida, archivada o transmitida en forma alguna o mediante cualquier sistema, ya sea electrónico, mecánico o de fotorreproducción, sin la previa autorización de los editores.

Elaborado en México.

Índice

Presentación	11
Prólogo	13
Dedicatoria	15
Agradecimientos	17
Lista de dictaminadores	19
Introducción	21
Capítulo I. La gestión integral del riesgo hidrometeorológico en México: avances y limitaciones	25
Capítulo II. Desafíos de los sistemas locales de la gestión integral del riesgo de desastre, sistemas socioecológicos y cambio climático	39
Capítulo III. Metodología multidisciplinar en la evaluación integral del riesgo de inundación: caso de estudio Ensenada B.C., México	71
Capítulo IV. Variación del clima para Veracruz en los últimos 10 años enfocado a actividades agropecuario-ecológicas	97
Capítulo V. Potencial de desastres por inundación en la zona limítrofe entre Quintana Roo y Campeche, México	117
Capítulo VI. Análisis de degradación de la tierra en las cuencas hidrográficas de los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán, Jalisco, México	135

Capítulo VII. Percepción y conocimiento sobre cambio climático de cafecultores en dos regiones de Veracruz, México: bases para la gestión integral de riesgos y la adaptación	155
Capítulo VIII. Plataforma IXIM para el análisis de multirriesgo agroclimático	165
Capítulo IX. Variabilidad climática de las precipitaciones extremas en el estado de Jalisco para el período 1981-2018	179
Capítulo X. Propuesta metodológica para el estudio y detección de granizos en el área metropolitana de Guadalajara, Jalisco	197
Capítulo XI. Eventos meteorológicos extremos en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco	221
Capítulo XII. Análisis histórico (1851-2019) de huracanes extremos en Quintana Roo, México	233
Capítulo XIII. Encuentros y desencuentros en la evaluación de la sequía en Veracruz	251
Capítulo XIV. Análisis de los datos de precipitación en el municipio de Xalapa, Veracruz, calidad y disponibilidad de la información	261
Capítulo XV. Compendio de datos bioclimáticos para la ciudad de Puerto Vallarta	275
Conclusiones	289
CVU Coordinadores	291

Presentación

La gestión de riesgos asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socioecológicos es una tarea pendiente en el quehacer científico internacional. El predominio de acciones desarticuladas y con esquemas de atención disciplinar y poco coordinadas sigue presente al momento de atender una emergencia por desastre. La ausencia de información para la toma de decisiones y falta de cuadros especializados que apoyen a los gestores locales es una petición recurrente por parte de los tomadores de decisiones.

Ante este llamado, la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim) genera una iniciativa local donde se reúnen especialistas en cinco líneas temáticas: a) Monitoreo, bases de datos y disseminación de información; b) Diagnóstico y análisis de procesos; c) Pronóstico meteorológico y prevención de desastres; d) Modelación climática y análisis de procesos físicos, y f) Políticas públicas y estrategia de comunicación. Todas ellas bajo un esquema fundamental de los sistemas socioecológicos.

Así, este libro presenta 15 experiencias sobre la gestión de riesgos asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos, donde 55 autores de 25 instituciones se conjuntaron para señalar los avances y retos en la articulación del conocimiento para la prevención, entendimiento y manejo de los desastres en México. A su vez, se involucraron 33 expertos temáticos de 26 instituciones que dictaminaron los trabajos que aquí se presentan. Lo anterior, permitió el involucramiento y trabajo colaborativo de la REDESClim, acción que se realizó de manera voluntaria y con aporte de cada una de las instituciones integrantes de la red.

Cabe destacar el trabajo colaborativo de la Universidad de Guadalajara (Dr. Julio Cesar Morales Hernández), Universidad del Mar (Dr. Miguel Ángel Ahumada Sempoal), Universidad Autónoma de Zacatecas (Dr. Luis Felipe Pineda) y Universidad Autónoma de Querétaro (Dr. Enrique González Sosa) quienes, bajo el principio de fomento a la REDESClim, propusieron el proyecto #310625 “gestión de riesgos asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socioecológicos” para ser apoyado por la Convocatoria 2020 de apoyo a congresos, convenciones, seminarios, talleres y demás eventos relacionados con el fortalecimiento del sector CTI del CONACYT, dependencia que continúa, desde

hace 10 años, fomentando el trabajo colaborativo de nuestra red temática de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos.

Dr. Oscar Frausto Martínez
Representante REDESClim 2021-2023

Prólogo

La Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim) trabaja en investigación, gestión y análisis de los impactos desde diferentes disciplinas, para dar respuesta a los problemas complejos en los socio-ecosistemas, gracias sus 5 líneas temáticas: 1) Monitoreo, base de datos y disseminación de información, 2) Diagnóstico y análisis de procesos, 3) Pronóstico meteorológico y prevención de desastres, 4) Modelación climática y análisis de procesos físicos y 5) Políticas públicas y estrategia de comunicación. En dichas líneas se agrupa casi un centenar de académicos y miembros de la sociedad civil de diferentes entidades federativas de México, con la finalidad de prevenir y reducir el riesgo y la vulnerabilidad del socio-ecosistema en México, mediante la investigación y evaluación interdisciplinaria de los procesos físicos de los fenómenos naturales.

Uno de los retos académicos es presentar hipótesis de trabajos, discutir entre pares y lograr encontrar soluciones viables, que contribuyan a la prevención, gestión integral y mitigación de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos climáticos; para ello, la REDESClim ha establecido las reuniones nacionales como el espacio de diálogo con los sectores público y privado donde, mediante la presentación de estudios de caso, estudios, resultados y estrategias, es posible contribuir al estado del conocimiento para una mejor toma decisiones, donde el aprendizaje sea un mecanismo mutuo de realimentación para la academia y la sociedad.

La Octava Reunión Nacional de REDESClim se llevó a cabo en el Centro Universitario de la Costa (CUC) de la Universidad de Guadalajara, en el marco de una pandemia y siguiendo cada una de las recomendaciones sanitarias para evitar poner en riesgo a los participantes; en ese sentido, la modalidad fue semipresencial con el soporte tecnológico del CUC y amplia difusión en redes sociales. Una actividad de valor añadido a la reunión fue el taller para construir el perfil de resiliencia municipal ante desastres para los servidores públicos de Bahía de Banderas y Puerto Vallarta; además de facilitar un proceso de transferencia y asimilación tecnológica de un modelo climático para fines de pronóstico y prevención.

La exposición a eventos hidrometeorológicos y climáticos genera desastres de un enorme impacto en la economía y sociedad, incluyendo a los ecosistemas. Para el CENAPRED, el 90% de los daños y pérdidas son derivados de estos eventos,

razón por la cual aún es necesario discernir sobre las causas físicas, la variabilidad climática, la vulnerabilidad y las múltiples relaciones con otras esferas.

Es por ello que los análisis históricos con estadísticas significativas, los marcos contextuales de vulnerabilidad y sistemas socio-ecológicos, permiten extraer información real, obtener conclusiones vinculantes y mostrar experiencias enriquecedoras de la gestión integral del riesgo ante los desafíos de un sistema político, donde la evidencia de estudios multidisciplinarios e integrales en ocasiones suele ser soslayada. En su conjunto, el presente libro reúne conocimiento útil para la sociedad, la academia y los tomadores de decisiones.

La frecuencia e impacto de los desastres asociados a eventos hidrometeorológicos y climáticos han aumentado de manera significativa, y seguirán aumentando para las próximas décadas en México y en el mundo. Tenemos un conocimiento mínimo sobre las causas físicas y sociales que han generado dicha tendencia, es necesario reconocer la importancia estratégica de la prevención y la adaptación para un nuevo espacio donde los sectores gubernamental, social, privado y académico tienen un papel preponderante. Por esa razón, la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim) es un instrumento integrador de este esfuerzo conjunto, que analiza la articulación multisectorial frente al desastre.

Atentamente,

Dr. Carlos M. Welsh Rodríguez

Investigador del Centro de Ciencias de la Tierra

Representante de la RED temática REDESClim-CONACYT 2018-2019-2020

Dedicatoria

Este libro está dedicado al trabajo entre investigadores de diferentes disciplinas que colaboran a través de la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim), a cada uno de los colaboradores por sus valiosas aportaciones. Confiamos en que la edición sea justa con su esfuerzo, dedicación, generosidad y compromiso con la ciencia y la sociedad.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo institucional que hemos recibido por parte del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por su financiamiento brindado para la realización de este del proyecto 310625, denominado **“Gestión de Desastres Asociados de Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos en Sistemas Socioecológicos”** al Centro Universitario de la Costa de la Universidad de Guadalajara, por el apoyo logístico y administrativo en la realización del evento, a la Universidad del Mar, la Universidad Autónoma de Zacatecas y la Universidad Autónoma de Querétaro, por el esfuerzo en conjunto de todos los que formamos el grupo de trabajo de REDESClim-CONACYT. También, a quienes, a lo largo de este tiempo, han puesto a prueba sus capacidades y conocimientos en el desarrollo de este libro.

Lista de dictaminadores

Dr. Julio César Morales Hernandez

Universidad de Guadalajara

Mc. Raúl Torres Rico

Universidad Autónoma de Guerrero

Dra. Fátima Maciel Carrillo González

Universidad de Guadalajara

Dr. Luis Felipe Pineda

Universidad Autónoma de Zacatecas

Dr. Antonio Velázquez Ruíz

Universidad de Guadalajara

Dra. Eréndira Patricia Canales Gómez

Universidad de Guadalajara

Dra. Erika Sandoval Hernández

Universidad de Guadalajara

Dr. Miguel Ángel Ahumada Sempoal

Universidad del Mar

Dra. Mónica Cervantes Jiménez

Universidad Autónoma de Querétaro

Mc. Víctor Manuel Cornejo López

Universidad de Guadalajara

Mc. Claudia Elizabeth Torres Pineda

Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (DIMAR-CIOH), Colombia

Dr. Oscar Frausto Martínez

Universidad de Quintana Roo

Dr. Oyolsi Nájera González

Universidad Autónoma de Nayarit

Dr. Jesús Francisco Escalante Euán

Universidad Autónoma de Yucatán

Dr. Carlos Roberto Cerdán Cabrera

Universidad Veracruzana

Dra. Natasha Mylena Quevedo Castañón

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C.

Dra. Carolina Ochoa Martínez

Universidad Veracruzana

Dra. Aidé Beatriz Vázquez Sosa

Universidad de Quintana Roo

Dra. Anita Martínez Méndez

Universidad de Quintana Roo

Dr. Carlos Manuel Welsh Rodríguez

Universidad Veracruzana

Dra. Ana Cecilia Travieso Bello

Universidad Veracruzana

M. en C. Francisco Antonio Martínez

El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR)

M.C. Stephany Paulina Arellano Ramírez

Instituto de Astronomía y Meteorología-Universidad de Guadalajara

Dr. Álvaro López Lambrano

Universidad Autónoma de Baja California

Mc. Alejandra Sarahí Rivas Tapia

Universidad de Guadalajara

Dr. José Pablo Vega Camarena

Universidad Tecnológica de México

Introducción

La Octava Reunión Nacional de REDESClim que se celebró en el Centro Universitario de la Costa (CUC) de la Universidad de Guadalajara, tuvo como marco de articulación gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socio-ecológicos, donde se presentaron trabajos académicos que constituyen una aportación interdisciplinar integral. El evento pudo llevarse a cabo gracias a un modelo semipresencial, junto con un estricto protocolo sanitario, un alto compromiso institucional y el apoyo del CONACYT.

El enfoque de sistemas socio-ecológicos es un andamiaje estructurado que permite evaluar, analizar, entender y sistematizar un conjunto no homogéneo de elementos que sirvan como elemento para la gestión ambiental en las escalas local y regional. Por otro lado, el alto compromiso en las 28 ponencias presentadas, las discusiones virtuales y presenciales, la organización en mesas temáticas, arrojó un conjunto de estudios que sin lugar a dudas será motivo de reflexión, análisis y estudio en el ámbito de la gestión de desastres.

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

En el primer capítulo, Rodríguez y Morán presentan, desde la política pública, la estructura de la gestión integral del riesgo desastres en México, analizan el Sistema Nacional de Protección Civil y proveen conclusiones muy relevantes en el marco normativo, que deben ser necesariamente discutidas ampliamente con los gobiernos locales y con el poder legislativo para encontrar una dinámica de actuación efectiva, real y que garantice políticas de prevención.

En el segundo capítulo se presenta una visión de la gestión desde lo local, en el marco del sistema socio-ecológico, pero ante una amenaza global como lo es el cambio climático. Ubica que la reducción de riesgo de desastre necesita incorporar efectos y respuestas multidisciplinarios, señala que, a pesar de la evolución dinámica y marco de atención global, las amenazas pueden presentarse al mismo tiempo y exacerbar los impactos, generando respuestas diferenciadas con resultados poco efectivos. El uso de mecanismos de monitoreo y evaluación son herramientas útiles y complementarias para abordar estos problemas.

Para el tercer capítulo se evalúa una metodología específica para la inundación en zonas semiáridas. Este trabajo discute con precisión la relación de lo urbano (infraestructura, etc.) y el peligro ocasionado por patrones de lluvia que terminan por señalar la vulnerabilidad diferenciada, la necesidad de estructurar políticas públicas urbanas, códigos de construcción e, inclusive, la actuación de protección civil en comunicación con la academia, para poder evaluar la amenaza, la actuación y los efectos potenciales sobre la población.

Una de las actividades económicas indispensables para el sistema económico y la alimentación es el sistema agropecuario, es por ello que la Secretaría de Protección Civil de Veracruz, como parte de su trabajo en la construcción de productos climáticos, diseñó una herramienta funcional que permite a quienes desarrollan actividades en el sector contar con un elemento de ayuda para la toma de decisiones de manera integrada en el sistema de información estratégica del Gobierno de Veracruz. Es posible conocer esta herramienta en el cuarto capítulo del libro.

Los estudios de caso son herramientas que arrojan resultados valiosos cuando la metodología es sólida; en ese sentido, en el capítulo cinco se discute el potencial de desastres asociados a las inundaciones en un espacio geográfico determinado con un alto valor ambiental, visto desde esa óptica se observa el potencial de inundación y sus efectos. Sobre todo, en este capítulo se busca poner sobre la mesa de discusión temas que son importantes para hacer frente a estas amenazas, planeación, desarrollo urbano y métodos robustos de estudio.

Un elemento fundamental en la gestión de los desastres es el suelo y su degradación; razón por la cual, en el capítulo sexto, Sánchez Casanova *et al.* realizan un estudio donde se muestra la degradación del recurso suelo en cuencas hidrográficas del estado de Jalisco. Utilizan una serie temporal e integran indicadores como parte fundamental de su estudio y una herramienta tecnológica para obtener una visión socio-ecológica. Como resultado, es posible observar qué factores socio-económicos inciden en la degradación del suelo y que este, como tal, debe ser incluido en la políticas de planificación territorial.

El cambio climático es una amenaza real, los fenómenos hidrometeorológicos extremos son una amenaza local para sectores específicos; por ejemplo, para la producción de café. En el capítulo séptimo se presenta un estudio estructurado sobre la percepción y conocimiento del mismo entre productores del estado de Veracruz. Se discute que la fuente principal de información al respecto son los medios de comunicación, que a pesar de que es un tema de preocupación, identifican otros problemas más importantes, como la deforestación y contaminación, pero observan que el clima sí ha cambiado y que es necesario aplicar medidas de gestión integral del riesgo.

Las tecnologías de la información son una herramienta necesaria, subutilizada y sobrevalorada en ocasiones; pero en términos de la gestión integral del riesgo

para el sector agropecuario pueden ser una solución real, eficaz y conveniente si se les da la difusión y se hacen disponibles para todos. En este sentido, Origel Gutiérrez *et al.*, en el capítulo ocho, presentan un desarrollo tecnológico denominado Plataforma IXIM, que es un instrumento de base tecnológica que permite de manera simple las áreas de multiriesgo para zonas agrícolas, y provee de información específica del sector en un sistema de información geográfica.

En el capítulo nueve se discute la variabilidad climática en el estado de Jalisco, se expone y presenta como un factor detonador de riesgo de inundación y se asocia con eventos de teleconexión como elemento que modula su frecuencia. Estos estudios son necesarios para comprender las bases físicas de efectos socio-económicos.

Existen eventos extremos que tienen un impacto directo en el sistema económico y social, como lo son las granizadas. Los daños ocasionados por este fenómeno resultan cada vez más elevados; en el capítulo diez se presenta un estudio sobre éste fenómenos en el área metropolitana de Guadalajara, donde las condiciones sinópticas de fondo favorecen su desarrollo. Se presenta una metodología que puede ser de utilidad para otras regiones.

En el capítulo previo se presenta una metodología en un área determinada de estudio, misma que los doctores León y Pineda usan como marco para presentar de manera documentada los eventos meteorológicos extremos que, debido a las condiciones atmosféricas y ambientales, se relacionan con los desastres y la gestión de los mismos. Se explica que los factores que exacerban su impacto están asociados con la vulnerabilidad y que los fenómenos de mesoescala necesitan ser monitoreados ante el incremento de condiciones que inciden en el desastre.

Para cerrar la obra, Sánchez Rivera *et al.* presentan un análisis histórico de los huracanes en el estado de Quintana Roo. Su estudio ayuda a observar que la construcción social del riesgo se soslaya ante el desarrollo urbano y la planificación del territorio, razón por la cual es importante conocer la capacidad de resiliencia y vulnerabilidad de los sistema socio-ecológicos.

En el capítulo trece, sobre la sequía en Veracruz, se presenta la evaluación de la sequía, fenómeno que necesita de series largas de tiempo, métodos de estudio comparados y definiciones operativas similares en los organismo responsables de su declaración. Para ello, muestran las diferencias entre los datos del servicio meteorológico nacional y en Centro Nacional de Prevención de Desastres en sus declaraciones. Se señala que la sequía y sus efectos se han incrementado y que es necesario homogenizar instrumentos normativos en su gestión.

Uno de los grandes temas de la actualidad es relativo a la obsolescencia del programa de la instrumentación meteorológica y climatológica a nivel local, misma que ha sido motivo de estudio y reflexión por parte de la academia, en relación a los datos disponibles; el Dr. Luna presenta un análisis local de los datos de

precipitación para la ciudad de Xalapa y nos invita a reflexionar de manera activa sobre la calidad de la información sobre la precipitación.

Finalmente, para terminar este libro, Velázquez Ruiz *et al.* nos presentan un compendio de datos para la Ciudad de Puerto Vallarta, con la finalidad de que sean utilizados como datos bioclimáticos útiles para el diseño urbano.

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 en sistemas socio-ecológicos.

Atentamente,

Dr. Carlos M. Welsh Rodríguez

Investigador del Centro de Ciencias de la Tierra

Representante de la RED temática REDESClim-CONACYT 2018-2019-2020

Capítulo I

La gestión integral del riesgo hidrometeorológico en México: avances y limitaciones

Juan Manuel Rodríguez Esteves¹, Jorge Damián Morán Escamilla²

¹ Doctor en Ciencias Sociales con especialidad en antropología social.

Profesor-investigador de El Colegio de la Frontera Norte, sede Tijuana. Dirección electrónica: jesteves@colef.mx. Líneas de investigación: geografía del riesgo; antropología de los desastres y problemas socioambientales.

² Doctor en Ciencia Social con especialidad en sociología. Profesor-Investigador de Cátedras Conacyt, adscrito al Programa Agua y Sociedad, El Colegio de San Luis, A.C. Dirección electrónica: jorgemorane@gmail.com. Líneas de investigación: riesgos y desastres; tensiones y metamorfosis del paisaje; seguridad humana.

Resumen

La gestión del riesgo de desastres en México es de tipo reactivo, es decir, se atienden los efectos de las emergencias y los desastres una vez que éstos ocurren, lo que carece de un enfoque de gestión integral en la reducción del riesgo. A nivel nacional, el Sistema Nacional de Protección Civil (Sinaproc) es el modelo para atender los efectos de los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos. A nivel local, las entidades federativas reprodujeron este modelo y crearon sus propios sistemas estatales de protección civil, en la mayoría de los casos, a inicios de la década de 1990.

A partir del 2018, las modificaciones a la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal transfirieron la coordinación federal del Sinaproc, de la Secretaría de Gobernación a la recientemente creada Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, con lo que cambió su enfoque, de una visión de política interna a una visión de seguridad pública. Con este cambio, se busca la protección de las personas y sus propiedades desde la seguridad pública, pero aún no hay indicios de que se trate de reducir el riesgo.

El objetivo de este trabajo es analizar la situación que guarda el Sinaproc después de 34 años, poniendo especial énfasis en la atención al riesgo hidrometeorológico y sus impactos en el territorio nacional. Por otro lado, se hace un análisis de los instrumentos estatales con los que se intenta reducir el riesgo, como primera etapa para la gestión del riesgo hidrometeorológico,

es decir, el conocimiento de las amenazas a las que está expuesta la población. Entre las conclusiones, se destaca que el Sinaproc realmente debe ser una estructura de coordinación que requiere complementarse con instrumentos en la escala local que, en conjunto, se enfoquen a la verdadera reducción del riesgo de desastres hidrometeorológicos, bajo una política que privilegie la gestión integral del riesgo de desastres a nivel local, ya que es en este ámbito donde se puede ver materializada la reducción del riesgo.

Introducción

La gestión integral de riesgos es definida por la legislación mexicana como “el conjunto de acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos...” (Segob, 2012, p. 4). Para reducir el riesgo de desastres, se debe reconocer que el riesgo es parte de un proceso de construcción social (Oliver-Smith, 2020), donde intervienen fenómenos naturales que, de alcanzar cierta intensidad o magnitud, pueden constituir una amenaza y, por otro lado, una sociedad que es vulnerable a esa amenaza, la cual revela las relaciones y tensiones entre su medio ambiente y una comunidad.

Para alcanzar una verdadera Gestión Integral del Riesgo de Desastres (GIRD), el propio término de gestión involucra la injerencia de las instituciones de gobierno en su nivel nacional, estatal y municipal, la participación de la sociedad que puede ser afectada por una amenaza, así como otros sectores de la sociedad relacionados con el riesgo, como pueden ser los grupos de expertos, académicos y el sector privado. Los esfuerzos de estos actores son insumos para realizar acciones encaminadas a las políticas públicas, estrategias y procedimientos para reducir el riesgo y, con ello, contribuir al conocimiento de las causas estructurales de los desastres (Segob, 2012, p. 4).

El riesgo hidrometeorológico hace referencia a un evento “perturbador que se genera por la acción de fenómenos atmosféricos como ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres; tormentas de nieve, granizo, polvo y electricidad; heladas, sequías, ondas cálidas y gélidas, y tornados” (Segob, 2012, p. 3) con impactos negativos para la población. Para entender las causas de los desastres, se requiere que la GIRD esté orientada a particularizar a qué tipo de riesgo se refiere, ya que no es lo mismo generar políticas públicas para reducir el riesgo geológico, que para el riesgo hidrometeorológico.

El capítulo está dividido en dos partes. En primer lugar, se presenta un breve análisis del Sinaproc como modelo para implementar la GIRD. En la segunda parte, se presentan algunas reflexiones sobre la gestión integral del riesgo de desastre considerando los avances alcanzados a 34 años de haber sido creado el Sinaproc. El acercamiento metodológico se basa en la revisión de la normatividad sobre gestión

del riesgo de desastres y del Sinaproc, así como de los recursos aprobados por el Fondo de Desastres Naturales (Fonden), distribuidos por año y entidad federativa, como el principal instrumento para la atención y reconstrucción ante desastres, y sobre el cual descansa la GIRD del gobierno mexicano. De los alcances del Sinaproc, se presentan algunas recomendaciones para la reflexión-acción.

El Sistema Nacional de Protección Civil, modelo para la atención de los desastres

Los antecedentes del Sinaproc parten de dos momentos. En primer lugar, la creación del Plan de Auxilio a la Población Civil (Plan DN-III-E), en 1965, que consiste en la planeación estratégica-militar para atender a la población civil en caso de desastres. El Plan DN-III-E se puso en marcha un año después para atender a la población afectada por el desbordamiento del río Pánuco, tras el paso del huracán Inés por los estados de Veracruz y Tamaulipas (Sedena, 2019). El segundo momento, responde a los daños asociados al sismo de magnitud 8.1 en la Ciudad de México en 1985, que rebasaron a las instituciones federales y locales, y activaron la respuesta social ante la emergencia masiva (UNAM, 1985; Dynes, Quarantelli y Wenger, 1990, p. 115).

El Sinaproc fue creado en 1986 (Segob, 1986), y está definido en la Ley General de Protección Civil (LGPC) como:

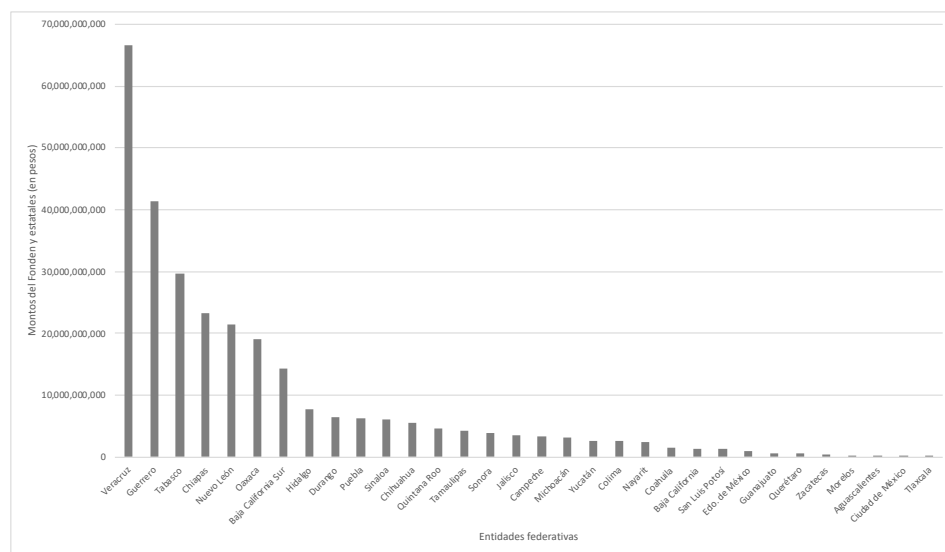
Un conjunto orgánico y articulado de estructuras, relaciones funcionales, métodos, normas, instancias, principios, instrumentos, políticas, procedimientos, servicios y acciones, que establecen corresponsablemente las dependencias y entidades del sector público entre sí, con las organizaciones de los diversos grupos voluntarios, sociales, privados y con los Poderes Legislativo, Ejecutivo y Judicial, de los organismos constitucionales autónomos, de las entidades federativas, de los municipios y las delegaciones, a fin de efectuar acciones coordinadas, en materia de protección civil (Segob, 2012, pp. 10-11).

El Sinaproc se basa en una estructura vertical, con el presidente de la nación a la cabeza. Desde su creación, el Sinaproc fue coordinado por la Secretaría de Gobernación (Segob, 1986, p. 2), la cual tiene entre sus responsabilidades conducir la política interior, condición necesaria para la participación de los diversos actores y niveles de gobierno en la política de protección civil en el país. Esta situación cambió el 30 de noviembre de 2018 cuando la coordinación del Sinaproc pasó a la Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana (SSPC), que entre sus funciones se encuentran “ejercer el mando de la fuerza pública para proteger a la población ante todo tipo de amenazas y riesgos” (Segob, 2018, p. 10). Con este cambio en

la coordinación del Sinaproc, cambia también su enfoque, ya que, de abordarse desde un tema de coordinación interinstitucional y sectorial en el país, pasó a ser un tema de seguridad nacional, donde se pone como eje central la seguridad de las personas, sin que ello garantice una verdadera coordinación con otras entidades de la administración pública o grupos sociales en la GIRD.

Un elemento central dentro del Sinaproc es el Fondo de Desastres Naturales (Fonden), que es un instrumento financiero que aplica recursos para mitigar los efectos de los fenómenos naturales perturbadores (SHCP, 2010, Rodríguez, 2004). La Gráfica 1 presenta los montos ejercidos entre 1999 a 2019, para atender los efectos de las emergencias y desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos ocurridos en México.

Gráfica 1. Distribución de recursos Fonden y recursos estatales por entidad federativa según eventos hidrometeorológicos (1999-2019)



Fuente: elaboración propia con información de CNPC, 2016 y 2020.

Los estados costeros, tanto en el Golfo de México como en el Océano Pacífico, han ejercido los mayores montos para la recuperación y reconstrucción de infraestructura. Esto se explica, en parte, por la exposición de los estados de Veracruz y Tabasco en la región del Golfo, y Guerrero, Chiapas y Oaxaca en las costas del Pacífico, los cuales son susceptibles a la influencia de lluvias severas, así como al impacto de ciclones tropicales, entre otros fenómenos. Los daños asociados a llu-

vias y ciclones tropicales representan más del 90% de los montos que el Fonden ha ejercido ante fenómenos hidrometeorológicos. De igual forma, las pérdidas económicas asociadas a fenómenos naturales han ido en aumento entre 2000 y 2015 (Rodríguez, 2018, p. 229).

El impacto de fenómenos hidrometeorológicos afecta de diferente manera a cada uno de los sectores de la sociedad, particularmente a su infraestructura. Existen sectores que, por su carácter estratégico, han demandado mayores gastos para su rehabilitación. El Cuadro 1, presenta los porcentajes de gastos ejercidos por sector afectado en las cinco entidades federativas que demandaron mayores recursos, entre 1999 y 2019.

Cuadro 1. Porcentaje de recursos aprobados por el Fonden a cada sector en los estados con mayor afectación por eventos hidrometeorológicos (1999-2019)

Estado	Sectores (%)							Total (%)
	Carretero	Hidráulico	Educativo	Vivienda	Urbano	Salud	Otros	
Veracruz	59.2	23.5	0.8	3.9	3.9	0.8	7.9	100
Guerrero	53.2	23.7	7.3	6.8	2.6	2.6	3.8	100
Tabasco	59.7	22.4	1.4	4.2	0.3	0.4	11.6	100
Chiapas	72.2	14.2	0.9	2.00	0.6	0.0	10.1	100
Nuevo León	41.1	6.6	1.6	1.9	29.0	0.3	19.5	100

Fuente: elaboración propia con datos de CNPC, 2016 y 2020.

El sector carretero recibió más recursos para su reconstrucción, ya que resulta estratégico para la comunicación y el traslado de mercancías, necesarias para la atención y recuperación ante desastres. El sector hidráulico también requiere de una atención particular, ya que es preciso restablecer las condiciones de normalidad en el menor tiempo posible, una vez que se cumpla con la normatividad establecida para ejercer los recursos (SHCP, 2010). Además de la importancia que éste tiene, también se asocia al tema de salud, ya que permite fortalecer los esquemas y estrategias de prevención de brotes epidémicos.

La exposición a fenómenos naturales intensos no es uniforme en el territorio. Las condiciones socioeconómicas de la población y del territorio influyen en el grado de exposición ante estos fenómenos, representando debilidades para afrontar el riesgo de desastres. La marginación es un “proceso estructural en relación al desarrollo socioeconómico alcanzado por nuestro país (Conapo y Conagua, 1993, citado por Téllez, 2016, p. 11). Al medir la marginación, se puede contextualizar

una parte de la realidad que enfrentan la población y el territorio para desafiar el riesgo y, a su vez, permite explicar la dimensión del desastre cuando el riesgo se materializa en éste.

La marginación está asociada a las debilidades de una comunidad, y estas debilidades se vinculan a los grados de vulnerabilidad social, económica e institucional, dimensiones que son centrales para la respuesta ante desastres. En este sentido, los estados que mantienen un grado mayor de marginación son los que han requerido mayores aportes del Fonden y de recursos estatales. Los estados de Guerrero y Chiapas mantuvieron grados de marginación muy altos durante 2015, lo que dificultó la implementación de políticas públicas para reducir el riesgo. Las dimensiones de la marginación están asociadas a las condiciones de educación, vivienda, ingresos monetarios, así como a la distribución de la población (Téllez, *et al.*, 2016, p. 13-14). Por su parte, el único estado que mantuvo un grado de marginación muy bajo fue Nuevo León, pero esto no lo eximió de sufrir daños de consideración ante el paso del huracán Alex en 2010, lo que requirió un gasto de \$16 252 millones de pesos, representando el 75.6% del monto total estatal recibido entre 1999 y 2019 (CNPC, 2016).

Por su parte, una de las funciones del Centro Nacional de Prevención de Desastres (Cenapred), que también forma parte del Sinaproc, es la coordinación e integración del Atlas Nacional de Riesgos (ANR), como insumo para la gestión del riesgo de desastres hidrometeorológicos. El ANR, de acuerdo con la Ley General de Protección Civil (LGPC) en su art. 2, se define como un “sistema integral de información sobre agentes perturbadores y daños esperados, resultado de un análisis espacial y temporal sobre la interacción entre peligros, la vulnerabilidad y el grado de exposición de los agentes afectables”. De igual forma, las entidades federativas tienen la responsabilidad de elaborar y actualizar sus respectivos atlas estatales y municipales de riesgo, en colaboración con el Gobierno federal (Segob, 2012, p. 29).

Los atlas estatales se encuentran integrados a la plataforma del ANR (Cenapred, 2020), lo cual permite su consulta interactiva para identificar los principales fenómenos hidrometeorológicos, tipos de amenazas y sus magnitudes, elementos expuestos a agentes perturbadores y los índices de vulnerabilidad social a nivel municipal. Cada uno de estos atlas estatales posee niveles de desarrollo y desagregación diferentes, pero resultan un referente para la política prevención del riesgo, contemplado en la propia LGPC en su art. 86.¹

¹ Estos atlas pueden ser elaborados con recursos del Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (Fopreden). En años recientes, algunas actualizaciones han sido apoyadas con recursos de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (Ruiz, Casado y Sánchez, 2015, p. 156).

Hacia una verdadera gestión integral del riesgo de desastres

La experiencia y la literatura muestran en el Sinaproc una falta de coordinación entre dependencias de la administración pública, al interior de las mismas y en los tres niveles de gobierno, que claramente hacen inoperantes los supuestos establecidos en la LGPC (Morán, 2020, p. 65). Además, no se percibe la posibilidad de lograr la transversalidad intersectorial vinculante que la misma requiere (Alcántara, *et al.*, 2019, p. 8), o la aplicación de un enfoque precautorio en las acciones y políticas multisectoriales, encaminadas a la prevención del riesgo de desastre, en las que se consideren amenazas múltiples (UNISDR 2015, p.10).² Esto no permite una GIRD,³ toda vez que las políticas siguen siendo sectoriales y, en ocasiones, contrapuestas entre sí, ya que, mientras que alguna instancia o política pública puede enfocarse a la prevención y gestión del riesgo de desastre, otra acción u organismo público puede fomentar la construcción del riesgo e incrementar la vulnerabilidad de algunos segmentos de la población, tal es el caso de las autorizaciones de construcción en zonas consideradas como de alto riesgo.

A pesar de que la responsabilidad de la gestión del riesgo en México es multisectorial, al menos como se concibe en el Sinaproc, el compromiso de llevarla a la práctica recae en una instancia, protección civil, que carece de una gama de atribuciones para poder realizar su labor, además, se caracteriza por tener debilidad estructural y fragilidad económica. En este sentido, destaca la categoría que recibe esta dependencia en cada entidad federativa, municipio e, incluso, a nivel federal, ya que se trata de una coordinación nacional de protección civil, que no alcanza un nivel de secretaría. Esto permite dimensionar la importancia que recibe al interior de la administración pública, además de las atribuciones que puede llegar a tener, así como el grado de capacidad técnica y financiera. A nivel nacional, solo en seis entidades protección civil alcanza el rango de secretaría, en tres el nivel de subsecretaría; y en el resto de los estados son unidades, coordinaciones o institutos de protección civil (Segob, 2018b).⁴ Esto restringe su capacidad de actuación y posibilidad de incidir en la prevención de los riesgos.

² Algunos ejemplos son abordados por Morán (2017) y Hernández y Barrios (en prensa), por citar algunos.

³ De acuerdo con Alcántara, *et al.*, 2019, “la gestión del riesgo se asocia desde la perspectiva de su causalidad a problemas ambientales, de desarrollo, y sostenibilidad, por lo que el papel de los organismos sectoriales centrados en la planeación y el ordenamiento territorial, vivienda, infraestructura, ambiente y recursos naturales, bienestar social, entre otros, son fundamentales en la arquitectura institucional de transversalidad demandada por la política pública en materia de Gestión Integral del Riesgo de Desastres” (Alcántara *et al.*, 2019, p. 11).

⁴ La información disponible es para algunos estados a 2018. Para las 32 entidades se verificó la existencia de unidades, coordinaciones, institutos, subsecretarías y secretarías de protección civil, a través de las páginas electrónicas.

El lugar que ocupa la protección civil dentro de la estructura gubernamental, ya sea estatal o municipal, juega un papel importante en la capacidad de gestión frente al riesgo. Cuando la protección civil tiene un nivel inferior a una secretaría, en este caso dirección o incluso unidad, implica que frecuentemente está adscrita a la dirección de seguridad pública, a la secretaría de gobierno o a la dirección de bomberos, le imprime una orientación particular, tanto en sus funciones o actividades como en su presupuesto anual, ya que los montos asignados a una secretaría, una dirección o a una unidad de protección civil varían de acuerdo a su jerarquía dentro del organigrama gubernamental.

En el caso de la debilidad interna, ésta tiene que ver con la falta de un presupuesto anual asignado que no solo garantice la operatividad y planeación a largo plazo de la misma, sino que posibilite el desarrollo e implementación de acciones preventivas y la incorporación de mayor y mejor personal capacitado. A nivel municipal, se puede observar que las unidades de protección civil carecen de personal y de herramientas necesarias para la atención de emergencias o desastres, y mucho menos para poder emprender una GIRD (Morán, 2016). En este mismo sentido, Morán (2017) “plantea el tema de la rotación de personal, pero dejaba fuera cuestiones como la falta de profesionalización en las tareas de protección civil y la necesidad de separar ésta de actividades como seguridad pública o gobierno —a las cuales, por lo regular, se subordina protección civil—; elementos que en conjunto podrían explicar la falta de proyectos de prevención” (Morán, 2017, p. 76).

Adicionalmente, Morán (2017) establece que:

Las diferencias en las respuestas a la solicitud de información muestran grandes contrastes en las capacidades de los municipios para atender las tareas de protección civil; mientras que algunas unidades cuentan con oficinas de enlace que canalizan las solicitudes a las áreas responsables, en otros casos la información es proporcionada directamente por el encargado de protección civil [...]. Todos estos elementos se pueden interpretar como falta de recursos, capacidades o desinterés, aunque lo más grave es la falta de observancia de la normatividad en materia de protección civil, en especial en lo referente a la existencia de un atlas de riesgos (Morán, 2017, p. 107).

Otro de los retos que enfrenta la gestión del riesgo en México, tiene que ver con la estructura vertical con la que funciona el Sinaproc. Pese a que el sistema buscaría una coordinación y, bajo esa lógica, un posible funcionamiento horizontal, en la praxis se tiene una estructura rígida que no permite la coordinación, restringe la cooperación y coarta la posibilidad de participación de la población. Esto último

se puede atribuir no sólo a la forma en que opera el Sinaproc, sino que también es resultado del propio sistema político mexicano y la forma de concebir y tratar a los afectados por los desastres.

Por lo tanto, para alcanzar una GIRD se requiere poner en marcha programas que estén acorde con la realidad, ya que se tienen riesgos que pueden gestionarse a nivel local reconociendo las estructuras y conocimientos de las comunidades. En este sentido, la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR por sus siglas en inglés) aconseja “velar por que se aprovechen como corresponda los conocimientos y las prácticas tradicionales, indígenas y locales, para complementar los conocimientos científicos en la evaluación del riesgo de desastres y en la elaboración y aplicación de políticas, estrategias, planes y programas para sectores específicos, con un enfoque intersectorial, que deberían adaptarse a las localidades y al contexto” (2015, p.15). De esta forma, las medidas deben ser contextualizadas; en las que el apoyo institucional se coordine con la población local y con las diversas instancias que se vean involucradas en la realización de acciones puntuales, según el tipo de riesgo de desastre. Ello, para no aplicar una política que conciba a la población, primero, como uniforme y, segundo, como un estorbo al cual se le debe replegar y marginar de las acciones a realizar. Toda vez que la experiencia muestra que, en la mayoría de los casos, el Gobierno no tiene la capacidad de respuesta requerida en el momento en que ésta se vuelve apremiante. Por ello, la población local se convierte en el actor más importante en la atención de los llamados riesgos intensivos.⁵

Conclusiones

Los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos han sido recurrentes en el territorio nacional, en primer lugar, por su ubicación geográfica y, en segundo, por su vulnerabilidad social. Los grados de marginación por estado, indican las debilidades de las condiciones socioeconómicas de la población, pero también del territorio, motivo por el cual requieren de la aplicación de políticas públicas dirigidas a la reducción de la marginación y, por lo tanto, de la vulnerabilidad social, así como políticas multisectoriales que permitan la reducción de ambas y el fortalecimiento de una GIRD.

México ha tenido avances importantes en materia de gestión del riesgo de desastres, por lo menos en América Latina. De acuerdo con el Banco Mundial

⁵ En Cuba, las Asambleas del Poder Popular son “los órganos superiores locales del poder del Estado. Tienen la más alta autoridad para el ejercicio de las funciones estatales y para ello, dentro del marco de su competencia, ejercen gobierno” (Llanes 2008, p. 20).

(2012), el país “se encuentra a la vanguardia de iniciativas encaminadas al desarrollo de un marco integral en gestión del riesgo de desastres, incluyendo el uso efectivo de mecanismos de financiamiento del riesgo y aseguramiento para manejar el riesgo fiscal derivado de los desastres” (Banco Mundial, 2012, p. 5). En este sentido, el Fonden, así como el fondo para la prevención de desastres (Fopreden), pueden representar instrumentos que permitan cambiar la visión asistencialista durante la emergencia y la reconstrucción, a una verdadera reducción del riesgo de desastres, y un mayor conocimiento de las causas estructurales del riesgo, que se traducen, en cierta medida, a través de la marginación de la sociedad. Sin embargo, habrá que esperar cómo se implementarán en los años próximos estos dos fondos, a raíz de la desaparición de 109 fideicomisos en México, donde se encuentra el mismo Fonden (Senado de la República, 2020).

El cambio reciente en la coordinación del Sinaproc, se puede interpretar como un retroceso, porque supone continuar con el modelo de atención al desastre y no a la reducción del riesgo, ya que se continúa con la visión reactiva de la protección civil y no con una GIRD. Para lograr una verdadera GIRD, se requiere una población informada y preparada que sea capaz de consolidar una coordinación con el gobierno y las distintas instancias que lo conforman. De igual modo, se requiere una armonización de políticas y objetivos que superen la visión de corto plazo. Además, es necesario entender que el problema de los desastres no es solo la contención del riesgo, sino que también intervienen problemas estructurales que tienen que ver con salud, educación, medio ambiente, trabajo, cultura, derechos humanos, tecnología, economía y todo aquello que contribuye a la construcción social del riesgo de desastre.

Referencias bibliográficas

- Alcántara-Ayala, I.; Garza, M.; López, A.; Magaña, V.; Oropeza, O.; Puente, S.; Rodríguez, D.; Lucatello, S.; Ruiz, N.; Tena, R.; Urzúa, M. y Vázquez, G. (2019). Gestión integral de riesgo de desastres en México: reflexiones, retos y propuestas de transformación de la política pública desde la academia. *Investigaciones Geográficas*, núm. 9. pp. 1-17.
- Banco Mundial. (2012). FONDEN. *El Fondo de Desastres Naturales de México: Una reseña*. Banco Interamericano de Reconstrucción y Fomento-Banco Mundial. Washington, D.C. Recuperado de <http://documents1.worldbank.org/curated/en/906551468123258202/pdf/753220WP0P130800Box374323B-00PUBLIC0.pdf>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres [Cenapred]. (2020). *Atlas estatales de riesgo*. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. Recuperado de <http://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx/archivo/cob-atlas-estatales.html>
- Coordinación Nacional de Protección Civil [CNPC]. (2016). *Recursos autorizados por declaratoria de desastres, 1999-2016*. México: Secretaría de Gobernación. Recuperado de http://www.proteccioncivil.gob.mx/es/ProteccionCivil/Recursos_Autorizados_por_Declaratoria_de_Desastre
- Coordinación Nacional de Protección Civil [CNPC]. (2020). *Recursos destinados a desastres por estado, 2010-2018*. México: Secretaría de Gobernación. Recuperado de http://www.gobernacion.gob.mx/es/SEGOB/Recursos_destinados_a_desastres_por_Estado
- Dynes, R. R., Quarantelli, E. L. y Wenger, D. (1990). *Individual and organizational response to the 1985 earthquake in Mexico City, Mexico*. Newark, Delaware. Disaster Research Center. University of Delaware. Recuperado de <http://uds-pace.udel.edu/handle/19716/2259>
- Hernández, M. y Barios, M. (en prensa). “Reubicaciones por desastres en México y sus similitudes con desplazamientos de control poblacional en otras latitudes del mundo”. En B. Méndez, J. D. Morán y J. M. Macías (Coords). *Mediaciones de la naturaleza y sociedad en el riesgo-desastre*. San Luis Potosí: El Colegio de San Luis.
- Llanes, J. (2008). *Cuba: paradigma en la reducción de riesgo de desastres*. Belgian Development Cooperation (DGCD), Estado Mayor Nacional de la Defensa Civil de Cuba y Oxfam International Secretariat.
- Morán Escamilla, J. D. (2016). *Situación del sistema estatal de protección civil en San Luis Potosí*. Seminario Virtual Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim). Recuperado de <https://www.virtualredesclim.com/copia-de-sesion-3-2016>.

- Morán Escamilla, J. D. (2017). *Escenarios de riesgos por sismos e inundaciones en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*. San Luis Potosí: El Colegio de San Luis.
- Morán Escamilla, J. D. (2020). "Flood Management Through Financial Cost Transfer Schemes in Mexico City". In: Vera-Cortés G., Macías-Medrano J.M. (Eds.) *Disasters and Neoliberalism*. Switzerland Springer, Cham.
- Oliver-Smith, A. (2020). Hurricanes, climate change, and the social construction of risk. *International Journal of Mass Emergencies and Disasters*, 38 (1), 1-12.
- Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR) (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030*. Ginebra: UNISDR.
- Rodríguez Esteves, J. M. (2004). Los desastres de origen natural en México: el papel del FONDEN. *Estudios Sociales*, vol. 12, núm. 23, enero-junio, pp. 74-96.
- Rodríguez Esteves, J. M. (2018). "Desastres y desarrollo: los ciclones tropicales en México". En C. Fuentes y S. Peña (Coords). *Desarrollo sostenible en la frontera norte de México. Reflexiones para una agenda de acción* (pp. 203-234). Tijuana, B.C.: El Colegio de la Frontera Norte.
- Ruiz, N; Casado, J. y Sánchez, M. (2015). Los atlas de riesgo municipales en México como instrumentos de ordenamiento territorial. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, núm. 88, pp. 146-162.
- Secretaría de Gobernación [Segob]. (1986). *Decreto por el que se aprueban las bases para el establecimiento del Sistema Nacional de Protección Civil y el programa de Protección Civil que las mismas contienen*. México. DOF, 6 de mayo de 1986. Recuperado de <http://www.ordenjuridico.gob.mx/Publicaciones/Compilacion/977.pdf>
- Secretaría de Gobernación [Segob]. (2012). *Decreto por el que se expide la Ley General de Protección Civil*. México: Poder Ejecutivo. DOF, 6 de junio. Recuperado de http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGPC_061120.pdf
- Secretaría de Gobernación [Segob]. (2018). *Decreto por el que se reforman, adicionan y derogan diversas disposiciones de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal*. México. DOF, 30 de noviembre de 2018. Recuperado de; <http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/legis/reflxiv.htm>
- Secretaría de Gobernación [Segob] (2018b). *Catálogo de Cursos de las Unidades Estatales de Protección Civil*. Recuperado de <https://www.gob.mx/segob/documentos/catalogos-de-cursos-de-las-unidades-estatales-de-proteccion-civil>
- Secretaría de Hacienda y Crédito Público [SHCP]. (2010). *Acuerdo por el que se emiten las Reglas Generales del Fondo de Desastres Naturales*. México. DOF, 3 de diciembre de 2010. Recuperado de https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5169686&fecha=03/12/2010

- Secretaría de la Defensa Nacional [Sedena]. (2019). *¿Qué es el Plan DN-III-E? Reseña histórica*. México. Recuperado de <https://www.gob.mx/sedena/acciones-y-programas/que-es-el-plan-dn-iii-e>
- Senado de la República. (2020). *Aprueba Senado, en lo general, extinción de 109 fideicomisos*. Boletín 297. 21 de octubre de 2020. Recuperado de <http://comunicacion.senado.gob.mx/index.php/informacion/boletines/49479-aprueba-senado-en-lo-general-extincion-de-109-fideicomisos.html>
- Téllez, Y; Almejo, R.; Hernández, A. y Romo, R. (2016). *Índice de marginación por entidad federativa y municipios. 2015*. México: Consejo Nacional de Población. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/459283/02_Capitulo_2.pdf
- UNAM. (1985). *El sismo del 19 de septiembre de 1985. Informe y evaluación preliminar*. México, D.F. Universidad Nacional Autónoma de México. Recuperado de https://web.archive.org/web/20120605040701/http://secre.ssn.unam.mx/SSN/Doc/Sismo85/sismo85_inf.htm

Capítulo II

Desafíos de los sistemas locales de la gestión integral del riesgo de desastre, sistemas socioecológicos y cambio climático

*Ma. Luisa Hernández Aguilar¹, Oscar Frausto Martínez²,
Gerardo Daniel López Montejó³*

¹ Doctora en Geografía. Profesora de Apoyo Técnico Académico del Área de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota. Centro de Información Geográfica. Universidad de Quintana Roo. Campus Chetumal.

Dirección electrónica: malu@uqroo.edu.mx

² Dr. Ing. Geógrafo. Profesor investigador de la División de Desarrollo Sustentable de la Universidad de Quintana Roo, campus Cozumel.

³ Maestro en Planeación Ambiental. Responsable del Centro de Información Geográfica, adscrito a la División de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Quintana Roo, campus Chetumal.

Introducción

El progreso alcanzado en la gestión del riesgo es diferente para cada país. El riesgo de desastres no es exógeno a los procesos de desarrollo. La aplicación de modelos de “desarrollo” puede generar situaciones de riesgo, principalmente, por la situación económica y demográfica de cada región (Hernández y Villanueva, 2012). Debemos prevenir la aparición de nuevos riesgos y reducir los existentes de forma sistemática. Los cambios no se producen de manera aislada ni en línea recta, lo que conlleva nuevos patrones de amenazas. La pandemia por COVID-19 ha puesto en evidencia lo anterior, además de marcar la fragilidad de nuestras interconexiones (UNDRR, 2020). Adoptar la política de cuarentena, incluida la interrupción de acceso a espacios públicos, a lugares de trabajo, escuelas y reducción de reuniones personales o a gran escala; implementar la política de distancia social; fortalecer la detección de personas de alto riesgo; sugerir el uso de masca-

rilla y creación de hospitales temporales de emergencia, han sido otras acciones acertadas. Sin embargo, aún siguen siendo acciones reactivas, no preventivas, no guiadas, sin análisis fundamentados. Tal como nos señala la Oficina de Naciones Unidas para la Reducción de Riesgo de Desastre (UNDRR, 2020, por sus siglas en inglés): “La lección más clara de la pandemia ha sido la necesidad de prevenir y estar preparado para los desastres”.

El enfoque de la RRD se ha ampliado, para centrarse tanto en las amenazas naturales como de origen humano, así como en los riesgos ambientales, tecnológicos y biológicos vinculados, promoviendo la resiliencia sanitaria. Sin embargo, como sociedad hemos comprendido globalmente que los riesgos sistémicos —tal como la pandemia ocasionada por el COVID-19— pueden dar origen a la inestabilidad y hasta a la falta de control a gran escala (UNDDR, 2019; Hernández, 2018; 2014). Lo anterior puso en evidencia a la Gestión Integral del Riesgo de Desastres (GIRD), a todos los niveles, y de manera multidisciplinar, desde la operatividad y los diferentes enfoques que existen para la Reducción del Riesgo de Desastres (RRD), haciendo más evidentes la debilidad de algunos gobiernos locales y de los grupos altamente vulnerables, como mujeres, niños, adultos mayores, por una parte; y los grupos de población cuya morbilidad radica en enfermedades crónicas como la diabetes, hipertensión, obesidad, entre otras. Asimismo, también salieron a la luz otras debilidades intersectoriales, para asegurar cubrir todos los posibles escenarios que nacen debido a la crisis sanitaria y, más aún, cuando aunado a la amenaza sanitaria se le sumó otra amenaza natural como huracanes, inundaciones, sismos, por ejemplo, produciendo contextos multiamenazas. Es entonces cuando surgen las preguntas ¿qué es lo que debe cambiar? y ¿cuál es la forma en que podemos lograr un cambio de paradigma?, para pasar de gestionar los desastres a gestionar el riesgo a escalas locales (UNDDR, 2019).

La ONU, desde tiempo atrás, ha desempeñado un papel importante en la preparación y respuesta a los desastres, iniciando en 1971 con la instauración de la UNDRO (Oficina del Coordinador de las Naciones Unidas en Caso de Desastre), si bien tenía tres ejes bien definidos: asistencia técnica, coordinación y comunicación en caso de desastre, no fue hasta la declaración del Decenio Internacional para la Reducción de los Desastres Naturales (DIRDN, 1990-1999), cuando lo anterior se vio fortalecido. No obstante, su objetivo era el análisis de amenazas desde una perspectiva física y su impacto en las infraestructuras. A mediados del DIRDN, en 1994, se realizó la Conferencia Mundial sobre la Reducción de los Desastres Naturales celebrada en Yokohama, Japón. Todo lo anterior, originó la Estrategia y el Plan de Acción de Yokohama (ONU/EIRD, 1994, citado por Hernández 2014). En el año 2000, los Estados miembros de las Naciones Unidas adoptaron la Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (EIRD), en calidad de sucesora de

las disposiciones emanadas del DIRDN, cuyo enfoque se centró en construir comunidades más resilientes (figura 1). Basándose en las conclusiones del análisis de la Estrategia de Yokohama (1994), los Estados firmantes se comprometieron a perseguir los objetivos para construir comunidades más resilientes para los siguientes diez años con el Marco de Acción de Hyogo (MAH, 2005-2015). Posteriormente, el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, se adoptó en la tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas celebrada en Sendai (Japón) de 2015, como marco sucesor (Hernández, 2014). Los cambios más importantes en Sendai son el marcado énfasis puesto en la gestión del riesgo de desastres en lugar de la gestión de desastres. Además de la implementación y la vinculación con la Agenda 2030 y sus ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), como una petición de los Estados miembros para reducir la carga de informes adicionales, y para que se dé lugar al establecimiento de métricas comunes y protocolos de informes integrados; el cambio de enfoque giró a que se logre el objetivo de llegar a un desarrollo sostenible basado en riesgos (figura 1).

Figura 1. Evolución de la agenda política global para la RRD



Fuente: elaboración propia con base al *Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres*, UNDDR (2019).

Por su parte, México ha logrado algunos progresos en la aplicación del MAH y Sendai en la RRD, pero aún existen grandes diferencias entre sus estados y sus municipios, tal como nos señalan Hernández y Castillo (2016). Particularmente,

en el estado de Quintana Roo, señalando que “la inversión en la gestión del riesgo de desastres a través de las autoridades locales es muy escasa, se ocupa más de prevención de riesgo que de la mitigación y recuperación”. En Quintana Roo y sus municipios los alcances en la preparación frente a fenómenos hidrometeorológicos radicaba en lo referido a los Sistemas de Alerta Temprana (SAT); sin embargo, cuando prevalecen las decisiones aparentemente dispares entre sectores, geografías y escalas, para actuar ante amenazas complejas, y muchas veces encadenadas, la preparación de la respuesta se concibe diferente. Es así que solo tres de los once municipios y el estado se calificaron con un 100% en el desarrollo de los SAT. Esto es solo una muestra de las diferencias encontradas a partir de la aplicación de la herramienta utilizada para este trabajo.

Partiendo del antecedente del trabajo de Hernández y Castillo (2012), en este capítulo se exponen los resultados alcanzados de los niveles de progreso en la RRD, bajo el Marco de Sendai y sus cuatro criterios indicativos, del estado de Quintana Roo y sus municipios. Los sectores evaluados fueron: el operativo (profesionales y voluntarios en protección civil), así como de tomadores de decisión (sector gobierno), a manera de aproximación. Para ello, se utilizó una serie de indicadores cualitativos para cada una de las prioridades de acción con cinco niveles de progreso, derivados del MAH. Asumiendo que existe una dimensión cuantitativa en lo cualitativo, y viceversa, y para un mejor enfoque comparativo de los resultados, los indicadores cualitativos se ponderaron, además, en cinco niveles, dando a cada nivel un valor de 20%, siendo el 100% el de mayor importancia relativa respecto de los demás datos. Las respuestas obtenidas para la prioridad número uno, la comprensión del riesgo de desastres, se asocian con los fenómenos hidrometeorológicos. La mayor amenaza para la población local son los ciclones tropicales, lluvias extremas, inundaciones pluviales, fluviales, costeras y lacustres, así como sequías, eventos naturales que se presentan año tras año en todo el territorio quintanarroense; donde los municipios de Lázaro Cárdenas (39%) y Felipe Carrillo Puerto (49%), quedaron en rezago, el estado alcanzó un 91%. Para la segunda prioridad, sobre la inversión para la resiliencia, los menos calificados fueron Lázaro Cárdenas y Tulum, con un 42% y 45%, respectivamente, y el estado con el 78%. En la tercera prioridad, relacionada con la recuperación, rehabilitación y reconstrucción, el puntaje más bajo fue para Lázaro Cárdenas (44%), al igual que para la cuarta, relacionada con fortificar la gobernanza del riesgo (37%). A nivel estatal, para estas dos últimas prioridades el resultado estatal fue de 87 y 89 por ciento. Sin embargo, existieron limitantes, como el no poder aplicar el instrumento a más actores de gobierno y más profesionales de protección civil (fueron dieciséis respuestas en total), por el entorno de confinamiento del COVID-19, pero con la ventaja que la muestra alcanzó al estado y a cada uno de los once municipios que lo componen, dando un panorama alentador de la

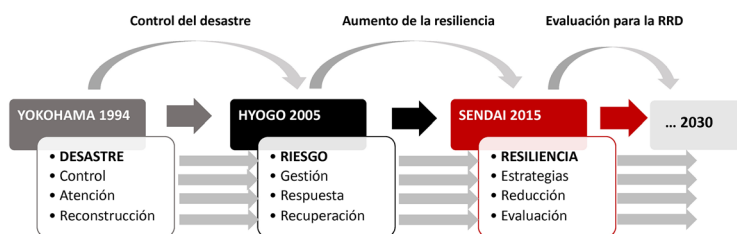
eficiencia del instrumento, logrando mostrar un componente integral y particular específico de cada ayuntamiento.

Marco teórico

Paradigmas globales

Entre Yokohama 1994 a Hyogo 2005, se observa un cambio de paradigma en las metas y estrategias adoptadas para la RRD a nivel mundial (figuras 1, 2 y 3). Ya no se habla de desastre sino de riesgo; se entendió que no se pueden controlar las amenazas, sino hacer más gestión para la prevención y mitigación del riesgo — más respuesta que atención— y se comprendió que reconstrucción es diferente a recuperación (Hernández, 2014). Entre Hyogo 2005 a Sendai 2015, la prioridad fue comprender el riesgo de desastres, fortalecer la gobernanza para gestionar dicho riesgo e invertir en la resiliencia (recuperación, rehabilitación y reconstrucción); además de contribuir al desarrollo de los conocimientos, las capacidades y la motivación para la RRD a todos los niveles (evaluación) (figuras 2 y 3). No obstante, la inestabilidad y hasta a la falta de control a gran escala por la pandemia de COVID-19 han alertado que es necesario un cambio de paradigma en la forma de enfrentar los riesgos; es decir, se debe considerar la naturaleza plural del riesgo. Hoy en día se están produciendo cambios más relevantes en todos los sistemas, principalmente en los socioecológicos, con consecuencias diferenciadas de acuerdo a la magnitud y escala de donde se originan. Es este el enfoque a adoptar del riesgo sistémico que se debe comprender y analizar, un riesgo endógeno o integrado en un sistema que no se considera en sí mismo un riesgo y, por lo tanto, generalmente no se realiza un seguimiento ni se gestiona, pero que se entiende a través del análisis de sistemas como un potencial de riesgo latente —o acumulativo— de un impacto negativo en el rendimiento general del sistema, cuando cambian algunas características del mismo (UNDRR, 2019).

Figura 2. Cambio de paradigmas mundiales para la RRD



Fuente: elaboración propia.

Sistemas Socioecológicos (SSE)

Un sistema socioecológico se define, de acuerdo con Berkes y Folke (1998, citado por Hernández, *et al.*, 2019), como un concepto holístico, sistémico e integrador entre el “ser humano y ambiente”. A partir del enfoque determinista, las capacidades de regeneración de los sistemas socioecológicos tienen un grado de pérdida o recuperación, de modo que un evento Imprevisto. En condiciones diferentes podría ser absorbido por la capacidad de recuperación del propio sistema; sin embargo, un evento similar en otro momento y de la misma forma puede desencadenar un cambio dramático y repentino, dejando una pérdida de la integridad estructural del sistema (Holling, 1973, citado por Hernández, *et al.*, 2019). Ambas visiones derivan en lo que hoy se maneja como un sistema complejo y adaptativo en el que los distintos componentes de los sistemas culturales, políticos, sociales, económicos, ecológicos, tecnológicos, entre otros, interactúan entre sí (Resilience Alliance, 2010). La adopción de un sistema multiagente en evaluaciones sujetas a riesgo sistémico es un enfoque emergente que está creciendo en importancia, ya que representa efectos de red y permite considerar la naturaleza aleatoria del comportamiento humano y la toma de decisiones (UNDRR, 2019).

El cambio climático, el factor que más intensifica el riesgo, es un ejemplo de estas propiedades que requieren ser observadas en una escala espacial de amplias extensiones (países) y con una resolución alta (a partir de registros climáticos). Tal como nos señalan Castillo y Velázquez (2015), los sistemas socioecológicos se van desarrollando de manera vertical y horizontal entre las esferas ecológica y social. En dichos sistemas pueden presentarse perturbaciones de diversa índole; por ejemplo, en una esfera ecológica, el cambio climático puede ser un factor que se combina con la degradación de ecosistemas, pérdida de biodiversidad, entre otros; mientras que, en una esfera social, pueden presentarse situaciones de desigualdad, injusticia, y polarización. Al conjuntar las perturbaciones de ambas esferas se pueden maximizar las repercusiones totales del sistema. Las propiedades emergentes son una característica esencial de estos sistemas. Entre ellas se encuentran la incertidumbre y la auto-regulación; en donde la primera, de acuerdo a la complejidad del sistema, la lleva a condiciones de inestabilidad; mientras que la segunda se refiere a una forma de comportamiento de cooperación entre las partes del sistema. Es por eso que, la complejidad, sugiere que “las propiedades en los sistemas mayores generalmente surgen a partir de interacciones en niveles menores” (Castillo y Velázquez, 2015).

En vista del aumento de la complejidad y de las interacciones en los sistemas humanos, económicos y políticos (por ejemplo, en el sistema financiero internacional, la tecnología de la información y las comunicaciones, las cadenas comerciales y de suministro, las megalópolis y la urbanización) y los sistemas naturales (marinos,

terrestres y aéreos), el riesgo presenta un carácter cada vez más sistémico (UNDRR, 2019; Hernández *et al.*, 2019; Castillo y Velázquez, 2015). Es el caso de la pandemia del COVID-19, que se convirtió en un desastre desencadenado sistémico, ya que el riesgo de esta amenaza natural extrema derivó en su materialización.

Riesgos sistémicos, el Marco de Sendai y la Agenda 2030

El Marco de Sendai (2015-2030) fue aprobado en la Tercera Conferencia Mundial de las Naciones Unidas sobre la RRD, celebrada en marzo de 2015 en Sendai, Miyagi (Japón); adoptó un enfoque interrelacionado y plural para comprender el riesgo, en el contexto del desarrollo sostenible y la erradicación de la pobreza (ONU, 2015). Tuvo como objetivo principal lograr el siguiente resultado en los próximos 15 años: “la reducción sustancial del riesgo de desastres y de las pérdidas ocasionadas por los desastres, tanto en vidas, medios de subsistencia y salud como en bienes económicos, físicos, sociales, culturales y ambientales de las personas, las empresas, las comunidades y los países” (ONU, 2015). Se acordaron siete metas mundiales (reducir la mortalidad; número de personas afectadas; pérdidas económicas, daños a infraestructuras por los desastres; así como incrementar por país estrategias para la RRD; cooperación internacional y disponibilidad de SAT), con la finalidad de apoyar la evaluación de los avances mundiales y nacionales. En este sentido, se complementarán y medirán los avances con indicadores pertinentes. Los Estados deben adoptar medidas específicas en todos los sectores, en los planos local, nacional, regional y mundial, con respecto a los siguientes cuatro niveles prioritarios de acción:

Prioridad 1: Comprender el riesgo de desastres.

Prioridad 2: Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo.

Prioridad 3: Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia.

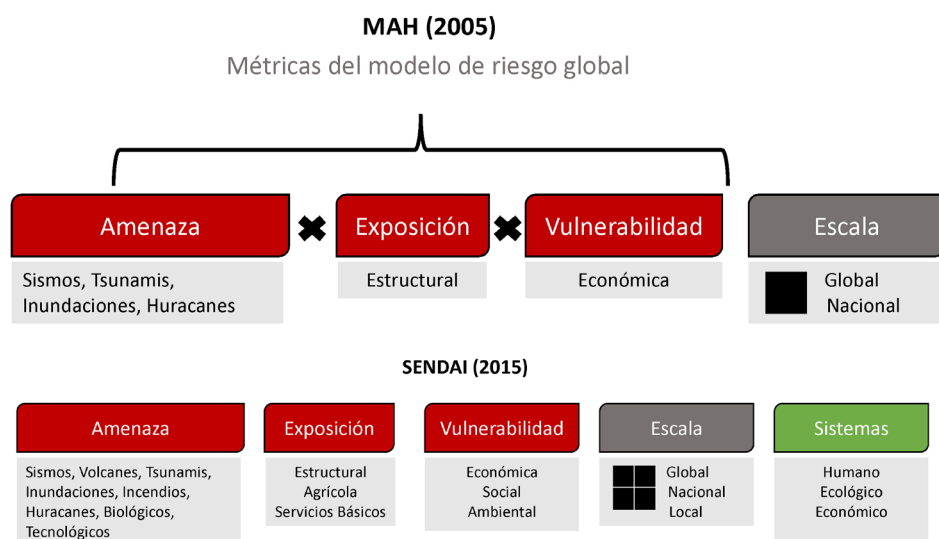
Prioridad 4: Aumentar la preparación para casos de desastre, a fin de dar una respuesta eficaz, y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción.

De la misma manera, señala el rediseño de metodologías de investigación para trabajar de forma multidisciplinaria, implicando a otras contrapartes no tradicionales, entre ellas, los conocimientos indígenas, por ejemplo, y recomienda las iniciativas innovadoras y colectivas (empresa, sociedad, academia), o los marcos nacionales multidisciplinarios para la GIRD (ONU, 2015). Los Estados, las organizaciones regionales e internacionales y otros actores pertinentes deben tener en consideración las actividades clave que se enumeran en relación con cada una de estas cuatro prioridades y deben ponerlas en práctica, como corresponda, teniendo

en cuenta sus respectivas capacidades, de conformidad con las leyes y la regulación nacional (véase anexo 1).

Desde la adopción del Marco de Sendai, se reconocen nuevos patrones de vulnerabilidad y formación de riesgos (UNDRR, 2019). Impulsa, también, nuevos enfoques conceptuales y analíticos para mejorar la comprensión y la gestión de la dinámica del riesgo y factores de riesgo en una variedad de escalas espaciales y temporales. Esto significa que la interacción sistémica entre humanos y el entorno es fundamental para el desarrollo sostenible. Como se ha mencionado, se transitó de un modelo a otro entre el MAH (2205) y Sendai (2015), de la gestión de desastres a la gestión de riesgos (figuras 1, 2 y 3), cambiando también la evaluación y análisis de la amenaza y la escala espacial. Después de 5 años de la admisión de Sendai, la transición entre la gestión del riesgo pasó a una comprensión de las interacciones dinámicas con riesgos sistémicos (figura 3). Este cambio de paradigma se ha descrito como el "manejar el mismo conjunto de datos que antes, pero colocarlos en un nuevo sistema de relaciones entre sí dándoles un marco diferente" (UNDRR, 2019). En respuesta a este desafío, la UNDRR ordenó —para apoyar el logro de los resultados y las metas del Marco de Sendai y la Agenda 2030— establecer un proceso para codificar y desarrollar un Marco Global de Evaluación de Riesgos (GRAF), para informar sobre la toma de decisiones y transformar el comportamiento, específicamente con respecto a los riesgos sistémicos (figura 3).

Figura 3. Evolución hacia un Marco Global de Evaluación de Riesgos



MARCO GLOBAL DE EVALUACIÓN DE RIESGOS (GRAF, 2020+)

Global Risk Assessment Framework (GRAF)



Fuente: elaboración propia con base a UNDRR (2019).

Por otra parte, la Agenda 2030 reconoce el papel central que el riesgo, la reducción y la resiliencia juegan en la política de desarrollo sostenible, haciendo referencia directa al Marco de Sendai, adoptando indicadores comunes y estableciendo metas relacionadas con la reducción de riesgos en muchos ODS (UNDRR, 2019). De la misma forma, acerca del riesgo de desastres y la resiliencia, en la Conferencia sobre el Clima de París (COP21), o el Acuerdo de París, aprobaron la adopción del Marco de Sendai, particularmente, en lo relacionado con las acciones que tienen implicaciones directas en la RRD (figura 1). Sumado a las contribuciones y la valoración de los países participantes del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), señalaron que existe un incremento de temperatura en el sistema climático, cuyos valores oscilan entre los 2.9°C y 3.4°C, esto daría lugar a futuras intensidades en las amenazas, sobre todo las relacionados con los peligros hidrometeorológicos, pudiendo superar la experiencia conocida, y alterar las ecuaciones de pérdidas y daños y las curvas de fragilidad de casi todos los sistemas humanos y naturales que se encuentran en riesgo.

La Gestión Integral del Riesgo de Desastres en México

La GIRD debe entenderse como un proceso complejo y sistemático conformado por una serie de decisiones, acciones y actividades, así como una coordinación transversal, entre los diferentes actores institucionales y sociales, para conocer y transformar las necesidades y debilidades expresadas en las diferentes vertientes de la vulnerabilidad y exposición (Alcántara, *et al.*, 2019). Estas acciones deben anticiparse y responder a los cambios imprevistos. Para ello, se necesitan marcos de planificación con capacidad de adaptación y previsión, que traten de identificar los factores de riesgo en los sistemas para prevenir y mitigar ese riesgo, y que a la vez permitan a los encargados de su aplicación reaccionar rápidamente y tomar las decisiones sobre la potencial financiación (UNDRR, 2019).

En México, el Sistema Nacional de Protección Civil (Sinaproc) y los sistemas estatales de protección civil, son las instancias especializadas en la RRD. Cada Estado tiene la responsabilidad primordial de prevenir y reducir el riesgo de desastres, incluso mediante la cooperación internacional, regional, subregional, transfronteriza y bilateral. De acuerdo a Hernández y Castillo (2016), la organización del Sinaproc, instaurado en 1986, se crea con un enfoque de carácter reactivo y de atención a emergencias. Entre su estructura organizacional se encuentra el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) creado en 1988; el Consejo Nacional de Protección Civil (CNPC), desde 1990; el Fondo de Desastres Naturales (Fonden), a partir de 1996; y el Fondo para la Prevención de Desastres Naturales (Fopreden), en 2003. En 2018, se crea por decreto la Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana, que tiene a su cargo el ejercicio de las atribuciones que, en materia de seguridad pública y nacional, así como de protección civil, le asignen las leyes y normatividad vigente, así como por mandato presidencial. En materia de los instrumentos más importantes que hacen referencia a la normatividad y legislación nacional, tenemos la Primera Ley de Protección Civil —de 2000— del país, elaborada con una perspectiva de Gestión de Riesgos (GR). En 2012, se actualiza y se expide la Segunda Ley General de Protección Civil (LGPC), bajo el enfoque de la Gestión Integral de Riesgos (GIR), cuya última actualización fue en 2018. Bajo esta ley se consolida el desarrollo del Atlas Nacional de Riesgos (ANR) a nivel federal, haciendo obligatorios los atlas estatales y municipales. Entre 2013 y 2018 la perspectiva se centra en el desarrollo de sociedades resilientes, anexando a la evaluación del riesgo (atlas de riesgos) y el perfil de resiliencia urbana (índice de resiliencia de las ciudades). Actualmente, se encuentra en espera de aprobación por el Senado la Iniciativa de la Ley General para la Gestión Integral de Riesgos de Desastres y Protección Civil, enviada en 2019, la cual revocaría la LGPC de 2012.

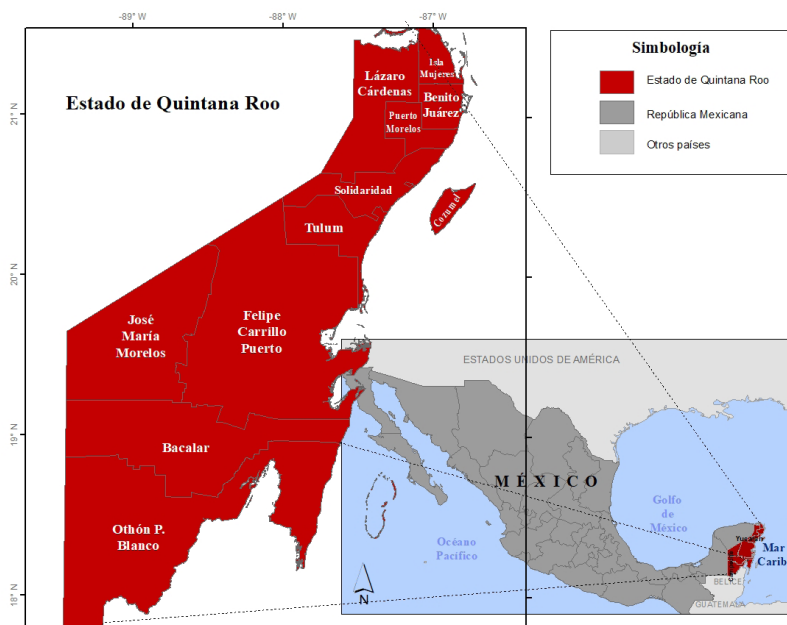
Ahora bien, y de acuerdo a CENAPRED (2020), las epidemias se consideran en el marco de actuación del Sinaproc; no obstante, la legislación también establece que, en materia de salubridad, el sector salud es la autoridad que encabeza las acciones en coordinación con las dependencias e instituciones públicas. Las autoridades en materia de protección civil tienen facultades para coordinar acciones en los tres órdenes de gobierno. Esta actuación, en el caso de la emergencia sanitaria por COVID-19, fue secundaria; su función se centró en colaborar con las autoridades sanitarias del país. No obstante, debieron tener el control epidémico en el país, o al menos coordinar las acciones implementadas, pues los sistemas de reducción de riesgo (protección civil, en el caso de México) saben cómo analizar el riesgo, encontrar debilidades y capacidades en otros sectores, cosas que no lo sabe el sector de salud.

Metodología

Área de estudio

El estado de Quintana Roo se localiza en la Península de Yucatán, al sureste de México, se divide administrativamente en once municipios, su capital la ciudad de Chetumal (figura 4). Limita al sur con los países de Guatemala y Belice; y con los estados de Yucatán y Campeche, al oeste. Cuenta con un extenso litoral de 865 kilómetros aproximadamente, los cuales en su mayoría son bañados por el mar Caribe, de gran reconocimiento turístico como el “Caribe mexicano”. Su actividad turística es la que más aportación tiene en el PIB estatal y nacional, esta dinámica atrae a población migrante que da lugar al crecimiento de las ciudades, principalmente las costeras, sometiendo al sistema ambiental y urbano a grandes presiones, y desarrollando posibles escenarios de riesgo. Todo el estado presenta un alto grado de vulnerabilidad y riesgo ante la temporada anual de amenazas hidrometeorológicas, como son los huracanes, principalmente los que se desarrollan en el Atlántico. Asimismo, la temporada de lluvias da pie a inundaciones fluviales, pluviales y costeras; y también experimenta, por temperaturas extremas, periodos de sequía.

Figura 4. Localización del estado de Quintana Roo y sus municipios



Fuente: elaboración propia.

Procedimiento

La metodología aplicada a este trabajo fue de índole cualitativa, con el empleo de la herramienta de cuestionario, a manera de aproximación. Las preguntas (indicadores) corresponden a cada acción propuesta para alcanzar la meta de cada una de las cuatro prioridades del Marco de Sendai (2015); éstas acciones se encuentran definidas en el instrumento rector de la agenda internacional (ONU, 2015). El levantamiento de la información se hizo vía web en el mes de agosto de 2020, desde una forma digital (véase anexo 1). En parte, por el contexto en el que nos encontramos por el COVID-19, y las medidas de prevención, y por las ventajas que las plataformas digitales conllevan, como: rapidez en la obtención de la información, bajo costo, flexibilidad en el tiempo para responder, privacidad y acceso desde cualquier dispositivo móvil. No obstante, también comprende desventajas, como la imposibilidad de controlar quién responde, validez y representatividad de la muestra, así como el alcance a más sectores relacionados con la reducción del riesgo.

Para medir los avances en las acciones señaladas en el Marco de Sendai (ONU, 2015) para la primera prioridad se emplearon 15 indicadores; para la segunda 11; para la tercera 17 y para la cuarta, y última, 15 (anexo 1). Los sistemas evaluados fueron: sistema operativo de gestión de riesgo (profesionales y voluntarios en protección civil); así como el sistema institucional a través de los de tomadores de decisión; y sistema de salud a escala municipal, a manera de aproximación. El sistema de gestión de riesgos a escala estatal, estuvo representado por la Coordinación Estatal de Protección Civil de Quintana Roo (Coeproc), gran apoyo para contactar con cada representante de las Direcciones Generales de Protección Civil de los municipios. El total de respuestas recibidas fue de 16, que comprendieron los 11 municipios en los que se divide el estado (figura 4). Cada una de las prioridades de acción se evaluó con cinco niveles de progreso, derivados del MAH y de la investigación de Hernández y Castillo (2012), (anexo 1), para un mejor enfoque comparativo de los resultados entre el estado y sus municipios. Entre éstos últimos, los indicadores cualitativos se ponderaron, además, en cinco niveles cuantitativos, dando a cada nivel un valor de 20%, es decir una cuantificación del avance, siendo el 100% el de mayor importancia relativa respecto de los demás datos.

Resultados

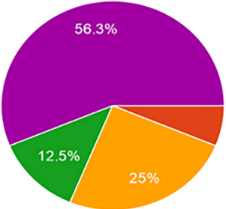
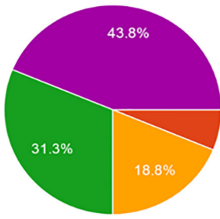
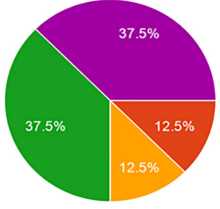
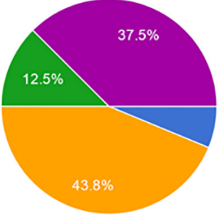
Se observan grandes diferencias entre el estado y municipios en las acciones percibidas e implementadas para lograr las cuatro prioridades de progreso del Marco de Sendai, así como en los sistemas entrevistados. En este apartado se exponen los resultados más significativos obtenidos y el análisis de los datos en tres formas diferentes: 1) desde la aplicación del cuestionario en línea, la muestra total; 2) análi-

sis cuantitativo de las respuestas entre estado y municipios y sistemas; y 3) análisis comparativo solo por prioridad entre estados y municipios. Sin embargo, ello se puede consultar el Anexo 1, donde se encuentran todas las respuestas obtenidas.

Resultados obtenidos desde el cuestionario en línea

Los resultados generales, presentados en la Figura 5, corresponden a la muestra total, de la cual se eligió un indicador representativo para cada prioridad, a manera de ejemplo. Para la primera prioridad el 56.3% —es decir, 9 de los encuestados— expresa estar en un nivel 5, asumiendo un logro total y un compromiso sostenido. El nivel 2 fue el menor obtenido, con el 6.3% (1 respuesta). Para la segunda prioridad, relacionada con el fortalecimiento de la gobernanza del riesgo, solo el 43.8% opina que está en el nivel 5 (7 entrevistados); cinco en un nivel 4 (31.3%) y el nivel 2 fue el mínimo obtenido. Para la prioridad 3, que tiene por meta invertir más para lograr mejor resiliencia, los resultados obtenidos fueron no llegaron más que a un 37.5% para los niveles 5 y 4, y un 12.5% para el 3 y el 2, de acuerdo al indicador elegido. La respuesta puede derivarse de si los municipios cumplen con el instrumento del atlas de riesgo, lo cual podría ser contrastado con los que cuentan con esas evaluaciones y los que no (figura 5). Para la última prioridad, la cuatro, el indicador elegido fue el dos, que valida el desarrollo de SAT en el territorio. Si bien, Quintana Roo siempre ha sido uno de los estados con mejor conocimiento y prevención hacia la amenaza de ciclones tropicales, siendo de los primeros estados en aplicar un SAT para este fenómeno, es notable que las respuestas se hayan inclinado más por el nivel cuatro (43.8%) en vez del cinco (37.5%). Como hipótesis podemos mencionar que el peso de la respuesta se relaciona con otros sectores y no de protección civil.

Figura 5. Muestra de las respuestas y evaluación obtenida del cuestionario aplicado

Prioridad 1. Comprensión del riesgo		Niveles de progreso	
IND11. ¿Se fomenta la inversión en innovación y desarrollo tecnológico en las investigaciones a largo plazo sobre amenazas múltiples (COVID-19/ inundaciones/huracanes) orientadas a la búsqueda de soluciones?			Nivel 1 No se ha logrado ningún progreso y/o el mismo ha cesado o se ha revertido.
Prioridad 2. Gobernanza			Nivel 2 Se ha logrado un progreso mínimo en las acciones para la RRD, y no existe un compromiso sistemático.
IND3. ¿Se realizó una evaluación de la capacidad técnica, financiera y administrativa para la gestión de la emergencia de COVID-19 a nivel local o estatal?			Nivel 3 Existe un compromiso institucional con la RRD, pero no hay un progreso considerable.
Prioridad 3. Inversión para la resiliencia			Nivel 4 Existe un compromiso sistemático a nivel de las políticas, pero hay una asignación insuficiente de recursos.
IND6. ¿Se aplicaron las evaluaciones del riesgo de desastres que existen en el (estado/municipio) para la elaboración y aplicación de políticas territoriales en el manejo del COVID-19?			
Prioridad 4. Aumento preparación de desastres			Nivel 5 Hay un logro total y un compromiso sostenido.
IND2. ¿Se desarrolló o utilizó un SAT para el manejo de la emergencia de COVID-19? ¿Se cuenta con SAT para otras amenazas y multi-amenazas?			

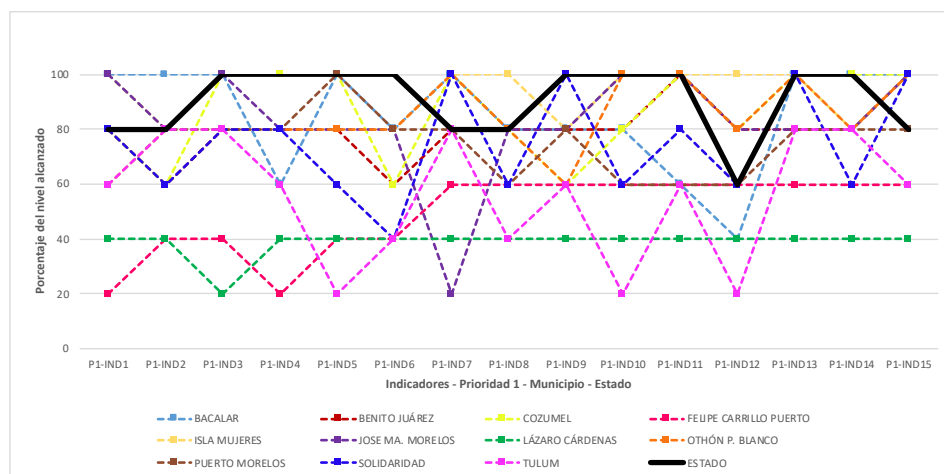
Fuente: elaboración propia con base a los resultados obtenidos del cuestionario “Criterios indicativos para establecer niveles de progreso en la Reducción del Riesgo de Desastres (RDD) enfrentando a la pandemia del COVID-19 a escala municipal (M) y estatal (E)”, (agosto, 2020).

Análisis cuantitativo de las respuestas

Los resultados alcanzados ponderados en niveles de porcentaje (%) a escala estatal y municipal muestran grandes diferencias entre ellos. En la Figura 6, se observa

que los municipios de Felipe Carrillo Puerto, Lázaro Cárdenas, Tulum y José Ma. Morelos, solamente alcanzaron un Nivel 1 (20%) de progreso, relacionado con la gestión de datos, la actualización y difusión de información sobre riesgo, capacitación, capacidad técnica y de investigación (véase anexo 1). Por otra parte, José Ma. Morelos, Bacalar, Cozumel, Solidaridad y Othón P. Blanco, así como el Estado, sobresalen en la promoción del uso de datos y gestión de riesgo (COVID-19 e hidrometeorológicos), la evaluación del riesgo, inversión desarrollo tecnológico, entre otros (anexo 1). Sin embargo, es de llamar la atención el contraste con el estado, el pico de descenso se encuentra en la acción de la incorporación de conocimientos de prevención, mitigación, respuesta y recuperación en casos de desastre, cuando es la instancia coordinadora a ese nivel. Cabe señalar que los municipios de Lázaro Cárdenas y José Ma. Morelos cuentan con muy pocos recursos económicos y apoyo prioritario, ya que no son municipios costeros, y tampoco cuentan con un Atlas de Riesgo (figura 6). Una de las ventajas observadas al realizar este análisis cuantitativo, es que muestra cuales son los indicadores; es decir, las acciones para impulsar mejores prácticas en la comprensión del riesgo. Si con el MAH no se logró colaborar y generar información sobre los riesgos, con el Marco de Sendai se puede lograr. Hay que adaptarse a los cambios y contar con planes y estrategias para cumplir con las acciones recomendadas.

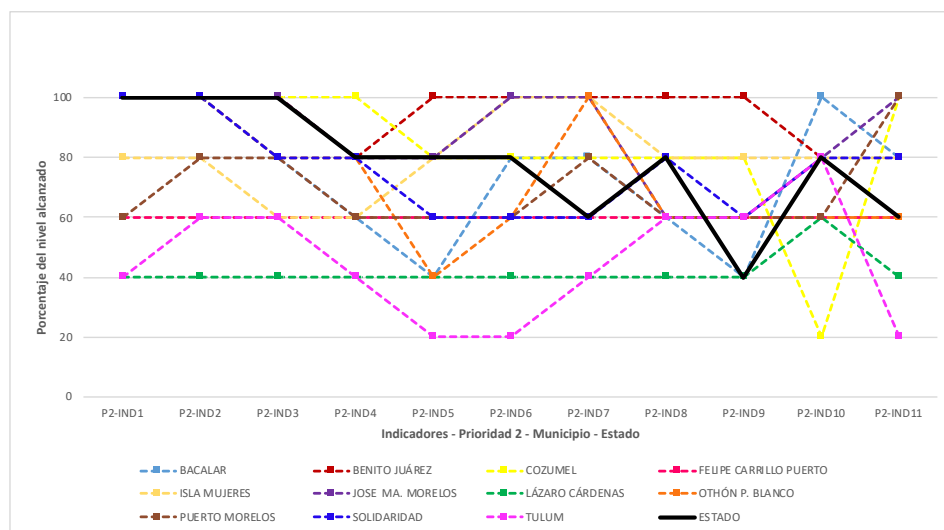
Figura 6. Prioridad 1. Comprender el riesgo de desastre



Fuente: elaboración propia con base a los resultados obtenidos del cuestionario “Criterios indicativos para establecer niveles de progreso en la Reducción del Riesgo de Desastres (RDD) enfrentando a la pandemia del COVID-19 a escala municipal (M) y estatal (E)”, (agosto, 2020).

Ahora bien, para la prioridad dos, vemos que son en los primeros indicadores de esta prioridad donde el estado se califica al 100%, a partir del tercer indicador el progreso va fluctuando (figura 7). El nivel más bajo alcanzado a escala estatal fue del 40% con relación al apoyo legislativo para la RRD. El municipio con niveles de progreso más bajos fue Tulum, en tres de los once indicadores de esta prioridad, concerniente con los debates entre legisladores e instituciones y la participación de representantes comunitarios (véase Anexo 1). Por su parte, Cozumel, igual llegó al 20% en el indicador 10, relacionado con certificaciones y premios. Como se observa, los porcentajes de avance más bajos se encuentran interconectados con el sistema jurídico, con los planes locales y estatales en materia de la gestión del riesgo (figura 7). Si bien, existen leyes a nivel nacional, como la LGPC (2012), cada estado y municipio se rige bajo su propia legislación al contar con autonomía administrativa. La importancia de análisis a escalas locales es esta: poder observar a detalle donde estamos fallando y debemos actuar. México, como país, entrega informes en cumbres internacionales de riesgo a un nivel general, escondiendo la falta de mecanismos e implementación de la RRD a escalas locales.

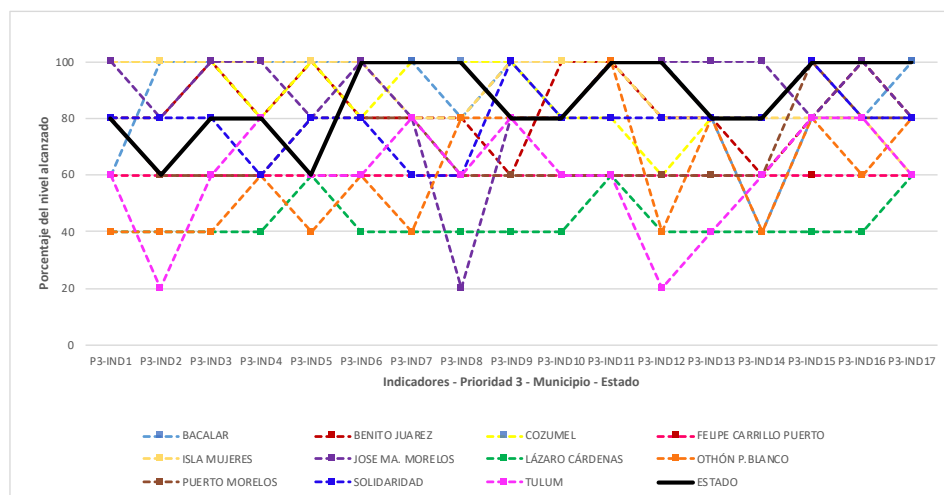
Figura 7. Prioridad 2. Fortalecer la gobernanza en la RRD para gestionar el riesgo



Fuente: elaboración propia con base a los resultados obtenidos del cuestionario “Criterios indicativos para establecer niveles de progreso en la Reducción del Riesgo de Desastres (RDD) enfrentando a la pandemia del COVID-19 a escala municipal (M) y estatal (E)”, (agosto, 2020).

En la Figura 8, se expone los resultados obtenidos para la prioridad 3. A nivel estado, de los 17 indicadores que componen esta prioridad, solo en 8 alcanzó el nivel del 100%. El valor más bajo fue del 60% para los indicadores 2 y 5, mecanismos de transferencia del riesgo y medidas de resiliencia en los lugares de trabajo, respectivamente (anexo 1). A nivel municipal, Tulum y José Ma. Morelos calificaron los más bajos con un 20% para los indicadores, 2 y 12 para el primero y el 8 para el segundo (figura 8). El indicador 12 se relaciona con las normas y el código de construcción, lo cual es importante para territorios amenazados por ciclones tropicales y con grandes infraestructuras turísticas. Solo José Ma. Morelos y el estado calificaron a un nivel del 100% (figura 8). Aunque es de llamar la atención que un municipio perteneciente a la Zona Maya de Quintana Roo califique a ese nivel, ello se puede deber a que no es municipio costero y a que diversos programas siempre aportan para la construcción de infraestructura social en ese territorio, no así para la prevención de riesgos, donde cuentan con muy poco equipamiento y personal.

Figura 8. Prioridad 3. Invertir en la RRD para la resiliencia

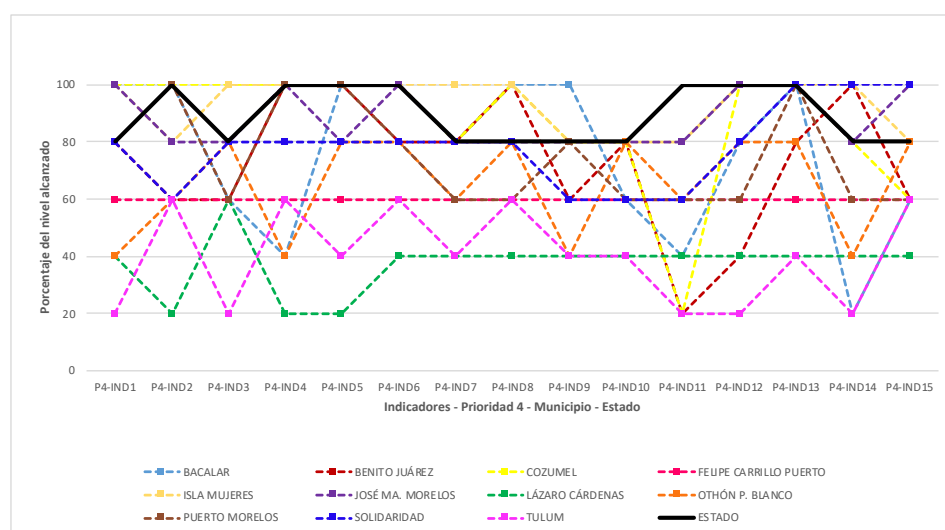


Fuente: elaboración propia con base a los resultados obtenidos del cuestionario “Criterios indicativos para establecer niveles de progreso en la Reducción del Riesgo de Desastres (RDD) enfrentando a la pandemia del COVID-19 a escala municipal (M) y estatal (E)”, (agosto, 2020).

Por último, para la prioridad cuatro los más bajos calificados fueron Tulum, Lázaro Cárdenas, Cozumel y Bacalar, alcanzando solo el 20% para algunos indicadores (figura 9). Estos indicadores, para el caso de Tulum, se encuentran referidos a si se actualizan los planes, políticas y programas de preparación a desastres; si se cuenta

con centros comunitarios para promover y sensibilizar y almacenar equipamiento de rescate y socorro; la posibilidad de trasladar instalaciones e infraestructura pública a lugares fuera de áreas de riesgo; la capacidad de evacuación por parte de autoridades locales; prestación de servicios psicosociales y de salud mental en caso de desastre (figura 9) (véase anexo 1). Lázaro Cárdenas por su parte, se evaluó en el nivel uno en los indicadores 2, 4 y 5: desarrollo de SAT, políticas de apoyo para empleados públicos y capacitación a las autoridades de protección civil y voluntarios para asegurar una mejor respuesta a las amenazas (anexo 1).

Figura 9. Prioridad 4. Aumentar la preparación para casos de desastres y dar respuesta eficaz en la recuperación, rehabilitación y reconstrucción



Fuente: elaboración propia con base a los resultados obtenidos del cuestionario “Criterios indicativos para establecer niveles de progreso en la Reducción del Riesgo de Desastres (RDD) enfrentando a la pandemia del COVID-19 a escala municipal (M) y estatal (E)”, (agosto, 2020).

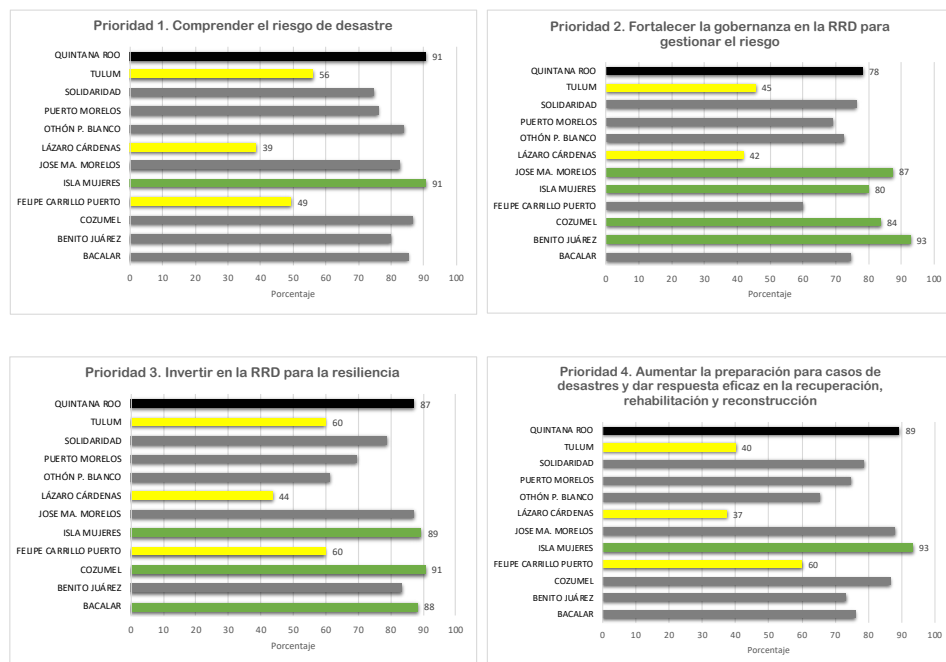
Análisis comparativo por prioridad entre estados y municipios

Los resultados comparados por prioridad entre el estado y sus municipios muestran que para la primera prioridad el estado tiene un progreso del 91% igualado por el municipio de Isla Mujeres (figura 10). Presentando los más bajos niveles Tulum (56%), Lázaro Cárdenas (39%) y Felipe Carrillo Puerto (49%). Lo que indica que faltan acciones por concretar o definir para una mejor comprensión del riesgo de desastre. Sin embargo, no debemos olvidar que estos resultados tienden a generalizar el riesgo para simplificarlo y cuantificarlo. En vista del aumento de la

complejidad y las interacciones en los sistemas humanos, económicos y políticos y los sistemas naturales (marinos, terrestres y aéreos), el riesgo presenta un carácter cada vez más sistémico. Por ello, estudios como este pueden servir de diagnóstico, pero son todos los sectores los que deben adoptar un enfoque de RRD. Para la prioridad 2, el fortalecimiento a la gobernanza, el estado alcanzó un nivel del 78% y fue superado por el municipio de Benito Juárez (93%), José Ma. Morelos (87%), Cozumel (84%) e Isla Mujeres (80%). Los de progreso más bajo fueron Lázaro Cárdenas y Tulum, con el 42% y 45%, respectivamente (figura 10). Ahora bien, para la prioridad 3, observamos que de la misma forma el estado se ve superado en progreso por algunos municipios, ya que éste alcanza un progreso del 87% con relación a la inversión para la resiliencia. Fue superado por Cozumel (91%), Isla Mujeres (89%) y Bacalar (88%); quedando en rezago los municipios de Lázaro Cárdenas (44%), y el 60% para Tulum y Felipe Carrillo Puerto (figura 10). Si aumentamos la comprensión del riesgo, fortalecemos la gobernanza en materia de riesgo, aumentamos las inversiones y apoyamos para una preparación mejor, se sientan las bases para la resiliencia de las personas, las comunidades, y los gobiernos (UNDRR, 2019).

Finalmente, para la prioridad cuatro, de la misma manera el estado fue superado, ya que este solo alcanzó un 89%, superado solo por Isla Mujeres con el 93% (figura 10). Esta prioridad busca aumentar la preparación en caso de desastres y dar una buena respuesta en la recuperación, rehabilitación y reconstrucción. Los municipios menos calificados fueron Lázaro Cárdenas con el 37%, Tulum con el 40% y Felipe Carrillo Puerto con el 60% (figura 10). Si bien esos resultados son *a priori*, para que se tenga en cuenta el riesgo de desastre se necesitarán estadísticas y datos sólidos, oportunos, exactos, desagregados, centrados en las personas y accesibles, que nos permitan determinar los avances realizados y encauzar las inversiones en consonancia. Esta práctica exploratoria mostró que las capacidades estadísticas se están abriendo para dar cabida a la colaboración y las sinergias entre los distintos sistemas de datos, cada vez más complejos, entre diferentes actores y sistemas, con los cuales se puede fortalecer la generación de datos, la capacidad estadística y la elaboración de informes, y estar al alcance de todos.

Figura 10. Comparación por prioridad entre estado y municipios



Fuente: elaboración propia con base a los resultados obtenidos del cuestionario “Criterios indicativos para establecer niveles de progreso en la Reducción del Riesgo de Desastres (RDD) enfrentando a la pandemia del COVID-19 a escala municipal (M) y estatal (E)”, (agosto, 2020).

Conclusiones

La UNDRR (2019) señala que tenemos que adoptar enfoques sistémicos y múltiples que puedan estudiar los fenómenos del riesgo en diversos niveles y sistemas, así como implicar a otras contrapartes no tradicionales, como los conocimientos indígenas, por ejemplo. Tradicionalmente, la financiación se ha centrado en reparar los daños tras los desastres. Para entender los riesgos es necesario comprender qué sabemos y qué no sabemos, se deben reformar las instituciones, los enfoques de gobernanza y las modalidades de investigación que tratan los riesgos de manera aislada y fuera de sus contextos socioecológicos y socioeconómicos. Herramientas como éstas, basadas en indicadores para la evaluación del progreso alcanzando en la gestión del riesgo, permiten la estimación de un concepto dado por una relación que puede ser definida como “acción-Meta”, para contextos específicos. Ello, logrará mostrar las debilidades y aciertos del sistema para reforzarlo o mantenerlo.

En México, el sistema legislativo se encuentra mejor definido a nivel federal que en sus sistemas de gobierno local: estados y municipios. Se deben intercambiar los conocimientos entre sectores, ya que cuanto mejor vinculados estén los datos, mejor se explicará la naturaleza interconectada de los riesgos. La información acerca de los riesgos debe incorporarse a los indicadores de desarrollo y servir de base para secuenciar la planificación, la preparación de los presupuestos y las acciones. De la misma forma, debemos realizar análisis para la RRD a otras escalas, sistemas —con enfoque de multiamenazas— y complementar con éstos la GIRD. Si bien el tamaño de muestra para esta primera aproximación fue pequeña, debido en parte, a la contingencia sanitaria del país, logró demostrar de una manera general las variabilidades de la GIRD entre los municipios y el estado de Quintana Roo, por lo que para futuros trabajos se sugiere ampliar el tamaño de muestra, así como tenerse en cuenta el número de municipios en los que se dividen los estados administrativamente.

Finalmente, se debe tomar muy en cuenta el cambio climático, ya que nos ha mostrado que las variabilidades no son lineales. Las variaciones de la intensidad y la frecuencia de las amenazas ya son una realidad. Al afectar a la naturaleza intensiva y extensiva del riesgo, el cambio climático puede dar lugar a tormentas más fuertes, exacerbar las inundaciones costeras y generar temperaturas más elevadas y sequías de mayor duración, convirtiendo a los fenómenos hidrometeorológicos en colosales amenazas al planeta.

Referencias bibliográficas

- Alcántara-Ayala, I., Garza, M., López, A., Magaña, V., Oropeza, O., Puente, S., Rodríguez, D., Lucatello, S., Ruiz, N., Tena, R. A., Urzúa, M. y Vázquez, G. (2019). Gestión Integral de Riesgo de Desastres en México: reflexiones, retos y propuestas de transformación de la política pública desde la academia. *Investigaciones Geográficas*, 98, 1-17. UNAM. <https://doi.org/10.14350/rig.59784>
- Castillo, L., y Velázquez, D. (2015). Sistemas complejos adaptativos, sistemas socioecológicos y resiliencia. *Quivera* 17(2): 11-32.
- CENAPRED (2020). *Guía para la prevención, preparación y la gestión de emergencias en el contexto del COVID-19*. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. Versión Electrónica, abril 2020. Ciudad de México. http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/424-GUIA_COVID19_DESASTRES.PDF
- Hernández, M-L., Frausto, O., y Arroyo L. (2019). “Resiliencia urbano-costera frente al cambio climático desde el enfoque socio-ecológico: el caso de Tulum, Q. Roo”. En Castillo, L., (Coord. †), *Resiliencia en ciudades costeras del Caribe Mexicano ante desastres por huracanes*. Universidad de Quintana Roo, 2019, ISBN UQROO: 978-607-9448-64-6, pp. 205-225.
- Hernández, M.L, Carreño, M.L y Castillo, L. (2018), Methodologies and tools of Risk Management: Hurricane Risk Index (HRi), International Journal of Disaster Risk Reduction, <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.08.006>.
- Hernández, M-L. y Castillo, L. (2016). “El sistema nacional de protección civil en México y la gestión de riesgos en sus estados y municipios”. En Campos, B., Orozco, M. y Velázquez, D., (Coord.), *Sociedad del riesgo en México: análisis y perspectivas* (1-24). Chetumal, Quintana Roo, México. ISBN: 978-607-9448-23-3, pp. 1-24.
- Hernández, M.-L. (2014). Evaluación del riesgo y vulnerabilidad ante la amenaza de huracanes en zonas costeras del Caribe Mexicano: Chetumal y Mahahual. *Tesis de Doctorado*. Universidad de Quintana Roo. División de Ciencias e Ingeniería. Chetumal, Quintana Roo, México.
- Hernández, M-L. y Castillo, L. (2012). Capacidad institucional ante la reducción del riesgo de desastre en Quintana Roo: Marco de Acción de Hyogo. *Quivera*. Revista de Estudios Territoriales, 14(2), 23-47. [fecha de consulta 6 de septiembre de 2020]. ISSN: 1405-8626. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=401/40126859003>
- ONU (2015). Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres*. 2015-2030, 15 marzo 2015, disponible en esta dirección: <https://www.refworld.org/es/docid/5b3d419f4.html> [Accesado el 1 septiembre 2020]

- Resilience Alliance. (2010). “Assessing resilience in social-ecological systems: workbook for practitioners. Version 2.0”. [Online] www.resalliance.org/3871.Php
- UNDRR (2020). UNDRR las Américas y el Caribe - *Revista: COVID-19*, un contexto de riesgos. <https://www.undrr.org/es/publication/undrr-las-americas-y-el-caribe-revista-covid-19-un-contexto-de-riesgos>.
- UNDRR (2019). *Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres*. Ginebra (Suiza): Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR).

Anexo 1. Criterios indicativos para establecer niveles de progreso en la Reducción del Riesgo de Desastres enfrentando a la pandemia del COVID-19 a escala municipal (M) y estatal (E) bajo el Marco de Acción de Sendai (2015-2030)

Indicadores	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Nivel 4	Nivel 5
	No se ha logrado ningún progreso y/o el mismo ha cesado o se ha revertido.	Se ha logrado un progreso mínimo en las acciones para la RRD, y no existe un compromiso sistemático.	Existe un compromiso institucional con la RRD, pero no hay un progreso considerable.	Existe un compromiso sistemático a nivel de las políticas, pero hay una asignación insuficiente de recursos.	Hay un logro total y un compromiso sostenido.
Prioridad 1. Comprender el riesgo de desastres	20%	40%	60%	80%	100%
1. ¿Se promovió la recopilación, el análisis, la gestión y los usos de datos para COVID-19?	MFCP	MLC	MT, MOPB	MBJ, MC, MPM, MS, E	MB, MIS MJMM
2. ¿Se exhortó al uso de las bases de referencia y su fortalecimiento para evaluar el riesgo del COVID-19, su vulnerabilidad, la capacidad de la institución, el grado de exposición de la población y sus posibles efectos, así como las características de la amenaza?		MFCP, MLC	MBJ, MC, MS	MIS, MOPB, MJMM, MPM, MT, E	MB
3. Se elabora, actualiza y difunde información sobre el riesgo del COVID-19, con base en la ubicación, incluidos mapas de riesgos, para los encargados de toma de decisiones, público en general y comunidades; utilizando, según proceda, tecnología de información geoespacial?	MLC	MFCP		MBJ, MIS, MOPB, MPM, MS, MT	MB, MC, MJMM, E
4. ¿Se evalúa, registra, comparte y se da a conocer al público, de manera sistemática, las pérdidas causadas por COVID-19: el impacto económico, social, sanitario, educativo y ambiental y en el patrimonio cultural?	MFCP	MLC	MB, MT	MBJ, MIM, MJMM, MOPB, MPM, MS	MC, E

5. ¿Se asegura que la información no confidencial por COVID-19, de pérdidas, esté disponible y accesible libremente, como corresponde?	MT	MFCP,MLC	MS	MBJ, MIM, MJMM, MOPB	MB, MC, MPM
6. ¿Se promueve el acceso en tiempo real a datos fiables sobre COVID-19, a través de información espacial <i>in situ</i> , incluidos los sistemas de información geográfica (SIG) y tecnologías de la información (TIC)?		MFCP, MLC, MS, MT	MBJ, MC	MB, MIM, MJMM, MOPB, MPM	E
7. ¿Se capacitó y educó a los funcionarios públicos a todos los niveles, la sociedad civil, las comunidades y los voluntarios, así como el sector privado, sobre el manejo de la emergencia de COVID-19?		MLC	MFCP, MJMM	MBJ, MPM, MT, E	MB, MC, MIM, MOPB, MS
8. ¿En su opinión, se promovió y mejoró el diálogo y la cooperación entre las comunidades científica y tecnológica, con los encargados de formular políticas sobre la gestión de la emergencia por COVID-19?		MLC, MT	MFCP MPM MS	MB, MBJ, MC, MJMM MOPB, E	MIM
9. ¿Se aprovecharon los conocimientos y las prácticas tradicionales, indígenas y locales, para complementar los conocimientos científicos en el manejo del COVID-19?		MLC	MC, MFCP, MOPB, MT	MB, MBJ, MIM, MJMM, MPM	MS, E
10. ¿Se aprovecharon los conocimientos y la capacidad técnica y científica local para elaborar y aplicar metodologías y modelos para evaluar el riesgo por COVID-19?	MT	MLC	MFCP, MPM, MS	MB, MBJ, MC	MIM, MJMM, MOPB, E
11. ¿Se fomenta la inversión en innovación y desarrollo tecnológico en las investigaciones a largo plazo sobre amenazas múltiples (COVID-19 + inundaciones/huracanes), orientadas a la búsqueda de soluciones?		MLC	MFCP, MPM, MT	MB, MS	MBJ, MC, MIM, MJMM, MOPB, E
12. ¿Existe la incorporación de los conocimientos: prevención, mitigación, preparación, respuesta, recuperación y rehabilitación en casos de desastre, como el COVID-19, en todos los niveles educativos?	MT	MB, MLC	MFCP, MPM, MS, E	MBJ, MC, MJMM, MOPB	MIM
13. ¿Se promovieron estrategias para reforzar la educación y sensibilización del COVID-19 a través de campañas y redes sociales?		MLC	MFCP	MBJ, MJMM, MPM, MT	MB, MC, MIM, MOPB, MS, E

14. ¿Se aplicaron los conocimientos del riesgo y la amenaza por COVID-19, para elaborar y aplicar políticas en RRD?		MLC	MFCP, MS	MBJ, MIM, MJMM, MOPB, MPM, MT	MB, MC, E
15. ¿Existió colaboración para difundir información sobre el COVID-19 entre organizaciones no gubernamentales y comunitarias?		MLC	MFCP, MT	MPM, E	MB, MBI, MC, MIM, MJMM, MOPB, MS
Prioridad 2. Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres para gestionar dicho riesgo	20%	40%	60%	80%	100%
1. ¿Se incorporó e integró la perspectiva de la RRD en todos los sectores, se incluyeron los marcos nacionales y locales de las leyes, regulaciones y políticas públicas, para definir las distintas funciones y responsabilidades, que ayuden hacer frente a la emergencia COVID-19?		MLC, MT	MFCP, MPM	MIM	MB, MBI, MC, MJMM, MOPB, MS, E
2. ¿Se aplicaron estrategias y planes nacionales y locales a fin reducir los riesgos existentes por COVID-19 y aumentar la resiliencia económica, social, sanitaria y ambiental?		MLC	MFCP, MT	MIM, MPM	MB, MBI, MC, MJMM, MOPB, MS, E
3. ¿Se realizó una evaluación de la capacidad técnica, financiera y administrativa para la gestión de la emergencia de COVID-19 a nivel local o estatal?		MLC	MFCP, MIM, MT	MB, MOPB, MPM, MS	MBJ, MC, MJMM, E
4. ¿Se establecieron los mecanismos necesarios para el cumplimiento de las disposiciones legales y reglamentos sectoriales (códigos construcción, uso de suelo, planificación, salud) para una atención adecuada a la emergencia de COVID-19?		MLC, MT	MB, MFCP, MIM, MPM	MBJ, MJMM, MOPB, MS, E	MC
5. ¿Se promovieron los debates institucionales entre legisladores y tomadores de decisión sobre los avances de los planes locales y estatales para el manejo emergencia COVID-19?	MT	MB, MLC, MOPB	MFCP, MPM, MS	MC, MIM, MJMM, E	MBJ

6. ¿Hubo participación de los representantes comunitarios dentro de los procesos y la gestión de la pandemia de COVID-19 a nivel local o estatal?	MT	MLC	MFCP, MOPB, MPM, MS	MB, MC, E	MBJ, MIM, MJMM
7. ¿Se establecieron foros de comunicación intergubernamental a nivel local o estatal para detectar el riesgo de la amenaza de COVID-19 y se presentaron informes sobre los planes trazados?		MLC, MT	MFCP, MS	MB, MC, MPM	MBJ, MIM, MJMM, MOPB, E
8. ¿Se otorgaron medios reguladores y financieros para que trabajen y se coordinen con la sociedad, comunidades y pueblos indígenas en el manejo de la emergencia COVID-19?		MLC	MB, MFCP, MJMM, MOPB, MPM, MT	MC, MIM, MS, E	MBJ
9. ¿Los legisladores apoyaron las medidas establecidas en la RRD mediante la elaboración de leyes o modificación de éstas ante el COVID-19?		MB, MLC, E	MFCP, MJMM, MOPB, MPM, MS, MT	MC, MIM	MBJ
10. ¿Se desarrollaron normas de calidad, como certificaciones, y se otorgan premios en materia de gestión del riesgo ante la emergencia de COVID-19?	MC		MFCP, MJMM, MLC, MOPB, MPM	MBJ, MIM, MS, MT, E	MB
11. ¿Existen políticas públicas para la prevención o el traslado, cuando sea posible, de los asentamientos humanos ubicados en zonas expuestas a riesgo de desastres, con sujeción al derecho interno y los sistemas jurídicos nacionales?	MT	MLC	MBJ, MFCP, MOPB, E	MB, MIM, MS	MC, MJMM, MPM
Prioridad 3. Invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia	20%	40%	60%	80%	100%
1. ¿Se asignaron los recursos necesarios, incluidos los recursos financieros y logísticos, para el manejo de la emergencia COVID-19?		MLC, MOPB	MB, MFCP, MT	MBJ, MPM, MS, E	MC, MIM, MJMM
2. ¿Los mecanismos para la transferencia y seguros del riesgo de desastres incluyen amenazas sanitarias como COVID-19?	MT	MLC, MOPB	MFCP, MPM, E	MBJ, MJMM, MS	MB, MC, MIM

3. ¿Se fortalecieron las inversiones públicas y privadas para la resiliencia ante desastres sanitarios (COVID-19) en instalaciones vitales: hospitales, escuelas e infraestructura física?		MLC, MOPB	MFCP, MPM, MT	MS, E	MB, MBJ, MC, MIM, MJMM
4. ¿Se protegió a las instituciones culturales y de colección, desde lo histórico, religioso y del patrimonio cultural, por la amenaza de COVID-19?		MLC	MFCP, MOPB, MPM, MS	MBJ, MC, MT, E	MB, MIM, MJMM
5. ¿Se promueve la resiliencia al riesgo de desastres en su lugar de trabajo, mediante medidas estructurales y no estructurales? ¿Se promovió a causa del COVID-19?		MOPB	MFCP, LMC, MT, E	MJMM, MPM, MS	MB, MBJ, MC, MIM
6. ¿Se aplicaron las evaluaciones del riesgo de desastres que existen en el (estado/municipio) para la elaboración y aplicación de políticas territoriales en el manejo del COVID-19?		MLC	MFCP, MOPB, MT	MBJ, MC, MPM, MS	MB, MIM, MJMM, E
7. ¿Existió una evaluación y representación cartográfica en la gestión del riesgo de desastres por la amenaza de COVID-19?		MLC, MOPB	MFCP, MS	MBJ, MIM, MJMM, MPM, MT	MB, MC, E
8. ¿Existe una revisión de los códigos y normas de construcción o prácticas de rehabilitación para la reconstrucción?	MJMM	MLC	MFCP, MPM, MS, MT	MB, MBJ, MIM, MOPB	MC, E
9. ¿Se aplicaron los enfoques de la RRD en la labor médica, para comprender el riesgo por la amenaza de COVID-19, o se dio capacitación al personal?		MLC	MBJ, MFCP, MPM	MJMM, MOPB, MT, E	MB, MC, MIM, MS
10. ¿Se fortaleció el diseño y la aplicación de políticas inclusivas y mecanismos de protección social, durante las fases de COVID-19?		MLC	MFCP, MPM, MT	MB, MC, MJMM, MOPB, MS, E	MBJ, MIM
11. ¿Se han incluido a las personas con enfermedades crónicas, y potencialmente mortales, en el diseño de las políticas y los planes para gestionar el riesgo por COVID-19, antes, durante y después del desastre?			MFCP, LMC, MPM, MT	MC, MS	MB, MBJ, MIM, MJMM, MOPB, E
12. ¿Se adoptaron políticas y programas que aborden la movilidad humana producida por COVID-19?	MT	MLC, MOPB	MC, MFCP, MPM	MBJ, MIM, MS	MB, MJMM, E

13. ¿Existen medidas para la RRD en los instrumentos financieros y fiscales por COVID-19?		MLC, MT	MFCP, MIM, MPM	MB, MBJ, MC, MOPB, MS, E	MJMM
14. ¿Se reforzaron los enfoques integrados de uso de suelo, ordenación territorio, medio ambiente y recursos naturales por COVID-19?		MB, MLC MOPB	MBJ, MFCP MPM, MT	MC, MIM, MS, E	MJMM
15. ¿Se aseguró la continuidad de los servicios básicos, comerciales y medios de vida ante COVID-19?		MLC	MFCP	MB, MBJ, MIM, MJMM, MOPB, MT	MC, MPM, MS, E
16. ¿Se reforzó la protección de los medios de vida y los bienes de producción ante la amenaza de COVID-19?		MLC	MFCP, MOPB	MB, MIM, MPM, MS, MT	MBJ, MC, MJMM, E
17. ¿Se promovieron e integraron enfoques de gestión del riesgo de desastres en toda la industria del Turismo ante la pandemia de COVID-19, como factor clave para impulsar la economía?		MT	MFCP, MIM, MLC	MBJ, MJMM, MOPB, MPM, MS	MB, MC, E
Prioridad 4. Aumentar la preparación para casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y para “reconstruir mejor” en los ámbitos de la recuperación, la rehabilitación y la reconstrucción	20%	40%	60%	80%	100%
1. ¿Se examinaron y/o actualizaron los planes, políticas y programas de preparación y contingencia para el caso de COVID-19? ¿Es regular esta práctica?	MT	MLC, MOPB	MFCP	MBJ, MPM, MS, E	MB, MC, MIM, MJMM
2. ¿Se desarrolló o utilizó un SAT para el manejo de la emergencia de COVID-19? ¿Se cuenta con SAT para otras amenazas y multiamenazas?	MLC		MBJ, MFCP, MOPB, MS, MT	MIM, MJMM	MB, MC, MPM, E
3. ¿Se cuenta con centros comunitarios para promover la sensibilización pública ante COVID-19 y almacenar los materiales necesarios para realizar las actividades de rescate y socorro?	MT		MB, MBJ, MFCP, MLC, MPM	MJMM, MOPB, MS, E	MC, MIM
4. ¿Hubo acciones y políticas para el apoyo a los empleados del sector público y se está preparando su recuperación después del COVID-19?	MLC	MB, MOPB	MFCP, MT	MS	MBJ, MC, MIM, MJMM, MPM, E

5. ¿Se capacitó a los trabajadores de Protección Civil y voluntarios para asegurar una mejor respuesta a la amenaza de COVID-19?	MLC	MT	MFCEP	MJMM, MOPB, MS	MB, MBJ, MC, MIM, MPM, E
6. ¿Existe la seguridad de la continuidad de las operaciones, incluida la recuperación social y económica, ante el COVID-19?		MLC	MFCEP, MT	MBJ, MOPB, MPM, MS	MB, MC, MIM, MJMM, E
7. ¿Se realizan ejercicios periódicos de preparación, respuesta y recuperación ante los desastres por pandemias, como la de COVID-19?		MLC, MT	MFCEP, MOPB, MPM	MB, MBJ, MC, MJMM, MS, E	MIM
8. ¿Hay cooperación de diversas instituciones, autoridades y actores pertinentes, a todos los niveles, para la reconstrucción/recuperación ante COVID-19?		MLC	MFCEP, MPM, MT	MJMM, MOPB, MS, E	MB, MBJ, MC, MIM
9. ¿Existen enseñanzas extraídas del desastre de COVID-19, que se están integrando a la recuperación en el desarrollo económico y social sostenible de las zonas afectadas?		MLC, MT	MB, MFCEP, MPM, MS	MBJ, MC, MIM, MJMM, MOPB, E	
10. ¿Existe una normativa para la preparación de la reconstrucción y recuperación después de los desastres? ¿Después del COVID-19?		MLC, MT	MB, MFCEP, MPM, MS	MBJ, MC, MIM, MJMM, MOPB, E	
11. ¿Existe la posibilidad de trasladar las instalaciones e infraestructuras públicas a lugares situados fuera de las zonas de riesgo? ¿Se trasladó alguna por COVID-19?	MBJ, MC	MB, MLC	MFCEP, MOPB, MPM, MS	MIM, MJMM	E
12. ¿Se reforzó la capacidad de las autoridades locales para evacuar a las personas que vivan en zonas propensas a los desastres; por ejemplo, con COVID-19?	MT	MBJ, MLC	MFCEP, MPM	MB, MOPB, MS	MC, MIM, MJMM, E
13. ¿Existe un mecanismo de registro de casos y una base de datos sobre la mortalidad causada por el COVID-19?		MLC, MT	MFCEP	MBJ, MOPB	MB, MC, MIM, MJMM, MPM, MS, E
14. ¿Se prestaron servicios de apoyo psicosocial y de salud mental a todas las personas necesitadas por COVID-19?	MB, MT	MLC, MOPB	MFCEP, MPM	MC, MJMM, E	MBJ, MIM, MS

15. ¿Se refuerzan las leyes y procedimientos nacionales sobre cooperación internacional ante la RRD? ¿Fue el caso para la amenaza de COVID-19?		MLC	MB, MBJ, MC, MFCP, MPM, MT	MIM, MOPB, E	MJMM, MS
--	--	-----	----------------------------	--------------	----------

RRD: Reducción de Riesgo de Desastre. SAT: Sistema de Alerta Temprana. COVID-19: Es la enfermedad infecciosa causada por el coronavirus. E: Estado. MB: Municipio de Bacalar. MBJ: Municipio Benito Juárez. MC: Municipio de Cozumel. MFCP: Municipio de Felipe Carrillo Puerto. MIM: Municipio de Isla Mujeres. MJMM: Municipio de José Ma. Morelos. MLC: Municipio de Lázaro Cárdenas. MOPB: Municipio de Othón P. Blanco. MPM: Municipio de Puerto Morelos. MS: Municipio de Solidaridad. MT: Municipio de Tulum.

Fuente: elaboración propia con base a los resultados del cuestionario “Criterios indicativos para establecer niveles de progreso en la Reducción del Riesgo de Desastres (RDD) enfrentando a la pandemia del COVID-19 a escala municipal (M) y estatal (E)”, bajo las 4 prioridades del Marco de Sendai (2015-2030). <https://docs.google.com/forms/d/1ntCgp8Z6klz7hMSIes8IDAlfc4rxlctxYbzhtVB3BLE/> prefil. Agosto 2020.

Capítulo III

Metodología multidisciplinar en la evaluación integral del riesgo de inundación: caso de estudio Ensenada B.C., México

*Ena Gámez Balmaceda*¹, *Alvaro López Lambraño*^{1,2}, *Carlos Villacís*³,
*Georges Seingier*¹, *Hiram Rivera Huerta*¹, *José Baró Suárez*⁴,
*Alvaro López Ramos*⁵, *Luisa Martínez Acosta*⁵

¹ Doctora en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Autónoma de Baja California. Dirección electrónica: ena.gamez@uabc.edu.mx

² Hidrus

³ Pacific Disaster Center, PDC

⁴ Universidad Autónoma del Estado de México

⁵ Universidad Pontificia Bolivariana

Resumen

El impacto de las inundaciones afecta negativamente los procesos de desarrollo en muchas ciudades del mundo, incluyendo zonas tropicales y zonas semiáridas. Es importante, por lo tanto, la implementación de una adecuada gestión del riesgo, de acuerdo a las características de cada zona, que proteja la vida de los ciudadanos, los bienes públicos, privados y los avances logrados en el proceso de desarrollo. Como una contribución a la gestión del riesgo, basada en evidencia y entendimiento del mismo, se presenta la evaluación integral del riesgo, sobre el impacto directo de las inundaciones en la ciudad de Ensenada. El proceso implica el análisis de los datos de precipitación para la evaluación de la amenaza, el impacto directo de la vulnerabilidad en las viviendas, los daños en su estructura y las pérdidas económicas. Además, se integra el análisis del impacto humano, pérdidas físicas, impacto socio-económico y determinación de prioridades. Se tomaron como base las guías del CENAPRED adaptadas a las condiciones locales, y complementadas con el análisis de estudios sobre evaluación de daños, estudios fronterizos y demográficos para la caracterización social de la ciudad. Los resultados muestran que las viviendas con mayor vulnerabilidad estructural son aquellas de materiales ligeros y de madera, corresponden

a las viviendas autoconstruidas en asentamientos informales y casas móviles. En contraste, las viviendas de mampostería con cimentación rígida son resistentes a la amenaza. Finalmente, se proporciona información necesaria para la determinación de prioridades por parte de las autoridades de gobierno y del sector operativo.

Introducción

El impacto de eventos naturales extremos afecta negativamente los procesos de desarrollo. Esto sucede especialmente en las regiones menos desarrolladas del mundo, donde las áreas urbanas crecen a una tasa mayor que el promedio global y sin una planificación adecuada. La presencia y el aumento constante de asentamientos informales aumentan la vulnerabilidad física y socioeconómica de las áreas urbanas. Dentro de estos eventos extremos, las inundaciones son los eventos naturales más frecuentes en el mundo, constituyendo el 50% de todos los eventos catastróficos reportados globalmente (CRED, 2020). En México, el problema de los desastres relacionados con inundaciones es frecuente en muchos estados, incluyendo zonas semiáridas, como Baja California, principalmente en Tijuana y Ensenada (CENAPRED, 2014; Rodríguez Esteves, 2007).

Ensenada sufre periódicamente los efectos adversos de las inundaciones, desde corrientes que arrastran vehículos y detienen el tráfico vehicular, hasta daños en viviendas e infraestructuras. Derivado de este problema, se han hecho algunos estudios de riesgo de inundación en el municipio, incluyendo el atlas de riesgos de Ensenada, tesis y artículos científicos. Sin embargo, se ha encontrado que algunos estudios, aunque contribuyen a conocer la situación del riesgo, solo hacen un recuento de inundaciones históricas, o solo se enfocan en el análisis de la lluvia, o solo evalúan la vulnerabilidad, o no emplean bien los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y riesgo (Pedraza Díaz, 2014; Soares, Blanco, García, Inzunza, & Rousseau, 2011; Torres Navarrete *et al.*, 2012). En ese sentido, para tener un buen entendimiento del riesgo, es importante emplear la terminología global de la Estrategia Internacional para la Reducción del Desastres.

El riesgo a desastre se define como las pérdidas potenciales, en términos de vida o bienes, y su evaluación incluye una revisión de las características técnicas de las amenazas, tales como su ubicación, intensidad, frecuencia y probabilidad; el análisis del grado de exposición y de vulnerabilidad, incluidas las dimensiones físicas y sociales. Amenaza es el evento que desencadena estas pérdidas, exposición se refiere a los elementos que están presentes en las zonas donde existen amenazas, y vulnerabilidad es la susceptibilidad de los elementos expuestos a sufrir daños (UNISDR, 2009). De igual manera, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) define al riesgo como $R = C \times V \times P$, que equivale a decir: el

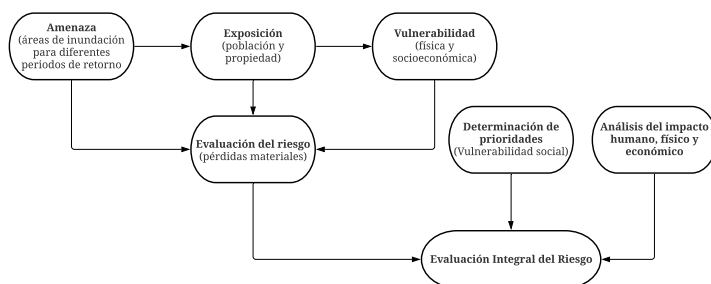
valor de los bienes expuestos (C) por la vulnerabilidad de la vivienda (V), por la probabilidad de la amenaza, en este contexto es peligro por inundación (P).

La herramienta principal para la gestión de riesgo, que todo municipio debe tener, son los atlas de riesgos. Los atlas de riesgos municipales se elaboran con base en los términos de referencia de la Secretaría de Desarrollo Agrario y Territorial Urbano (SEDATU), donde se indica el uso de las guías del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) para toda la República mexicana (CENAPRED, 2006; SEDATU, 2016). Sin embargo, considerando que estas guías están basadas en información física que es cambiante con el tiempo, deben tomarse como base, pero con una adaptación a las condiciones locales, ya que un estudio de riesgo es complejo y muy diferente en cada comunidad.

Dado lo anterior, el objetivo de este capítulo consiste en proporcionar una estrategia para una evaluación integral del riesgo, sobre el impacto directo de las inundaciones en la ciudad de Ensenada, tomando como base las guías del CENAPRED. La metodología de estas guías se complementa con la revisión de otros métodos y se implementa con los datos fisiográficos, socioeconómicos y culturales característicos de la zona. Las características más relevantes de la ciudad en este estudio son: el clima semiárido y su ubicación geográfica, en una zona fronteriza.

Para lograr este objetivo se evalúa la amenaza para diferentes periodos de retorno (Tr), posteriormente se elabora un modelo de exposición, para luego evaluar la vulnerabilidad física estructural en viviendas y las pérdidas económicas directas. Finalmente, se hace un análisis del impacto socioeconómico, la identificación de estructuras críticas y el análisis de prioridades para la gestión de riesgo. Este proceso metodológico se representa en la Figura 1. La metodología que se presenta también involucra conceptos de las ciencias físicas y sociales.

Figura 1. Diagrama general de la metodología propuesta para la evaluación integral del riesgo



Fuente: elaboración propia.

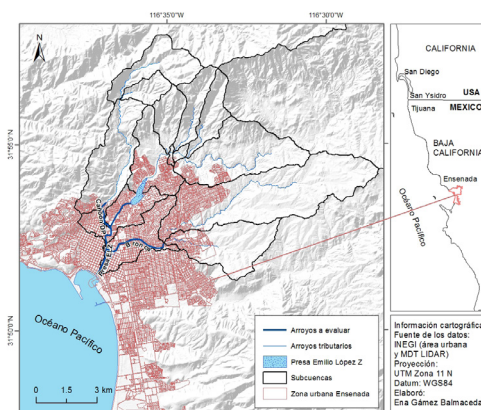
Amenaza

La amenaza por inundación, que es sinónimo de peligro, estará representada por mapas que contienen las áreas de inundación para los periodos de retorno de 25, 50 y 100 años. Se escogieron estos periodos de retorno, de acuerdo a un estudio de alerta temprana, en donde se concluye que a partir del periodo de retorno de 25 años se presentan inundaciones significativas en la ciudad de Ensenada (Gómez-Balmaceda, López-Lambrano, Seingier, & López-Ramos, 2019).

La ciudad de Ensenada está situada en el noroeste de México, en el estado de Baja California, se caracteriza por ser una zona semiárida, donde las precipitaciones máximas se presentan entre los meses de noviembre a marzo, con un promedio anual de 208.07 mm, siendo febrero el mes más lluvioso con 56.14 mm y julio el de menor pluviosidad con 8.72 mm y una temperatura promedio anual de 16 °C (López-Lambrano *et al.*, 2020). Pertenecen a la subcuenca B. Ensenada de la cuenca Río Tijuana – Arroyo de Maneadero (INEGI, 1995). Esta subcuenca desemboca en el Puerto de Ensenada, donde arriban barcos comerciales y turísticos.

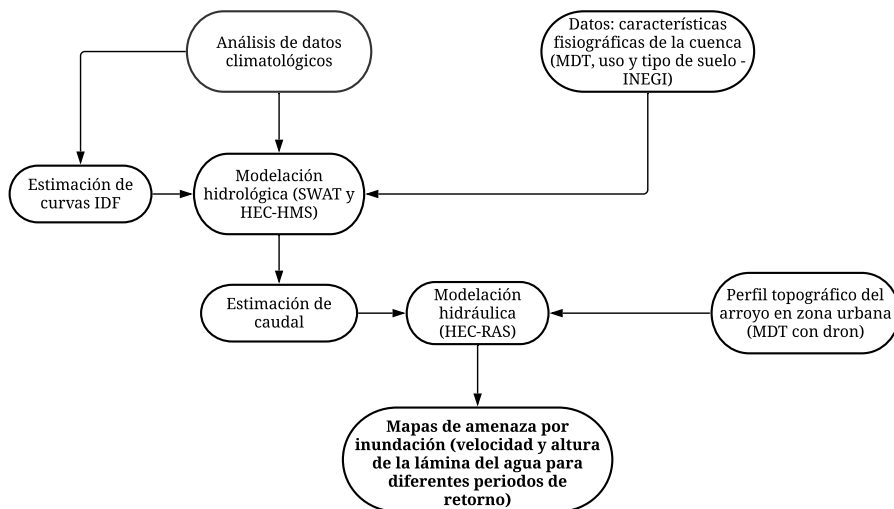
La ubicación geográfica, importancia comercial, industrial y económica de la ciudad ha ocasionado que tenga un crecimiento poblacional rápido en los últimos años (COPLADE, 2017). Dentro de este crecimiento, se encuentran viviendas en áreas aledañas a los arroyos, las cuales se considera que tienen la mayor exposición al riesgo de inundación en este estudio. La Figura 2 muestra el área de estudio, donde se observan los arroyos a evaluar: a la derecha el arroyo Bronce, a la izquierda el arroyo Cañón Doña Petra (DP) y al centro el arroyo Presa Emilio López Zamora (ELZ).

Figura 2. Área de estudio



Fuente: elaboración propia con base en datos de INEGI. A partir de las características del área de estudio, de los datos y métodos disponibles para la zona, se propone el proceso mostrado en la Figura 3, el cual contiene una serie de pasos para realizar la evaluación de la amenaza.

Figura 3. Proceso para la evaluación de la amenaza por inundación



Fuente: elaboración propia.

El primer paso para la evaluación de la amenaza, y dato principal, es el análisis de los datos de precipitación. En el caso de la ciudad de Ensenada se revisaron las curvas IDF con que cuenta la ciudad, y se encontró que fueron hechas hace más de veinte años y sin la descripción de cómo se elaboraron. Por lo tanto, se hizo una nueva estimación de estas curvas, con el análisis de las características de la lluvia de la zona y su variabilidad espacio temporal, con datos pluviográficos y pluviométricos para un periodo de 1940 a 2019. Esta información se obtuvo de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y de estaciones meteorológicas automáticas particulares, las cuales se detallan en Gámez-Balmaceda y colaboradores (2020).

De igual manera, se revisaron las herramientas necesarias para la realización de modelaciones hidrológicas y para poder estimar el caudal máximo; mientras que los datos de tipo de suelos y los límites de las cuencas se obtuvieron de Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Las herramientas hidrológicas revisadas fueron el *Soil Water Assessment Tool* (SWAT) y el *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), las cuales contemplan el método del número curva del (SCS) para la estimación de los escurrimientos superficiales (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2011; U.S. Army Corps of Engineers, 2017).

El SWAT proporcionó el parámetro asociado a los números de curva que posteriormente se utilizaron en el modelo HEC-HMS para el análisis de las sub-

cuencas de la Figura 2; del análisis se encontró que los mayores escurrimientos superficiales se generan cuando ocurren lluvias en las subcuencas de la zona urbana. Los caudales obtenidos con la modelación hidrológica para los tres arroyos en consideración, se muestran en el Cuadro 1. Posteriormente, basándose en las guías del CENAPRED, se realiza una modelación hidráulica, en este caso, empleando el modelo HEC-RAS. Adicional a la información referente al caudal máximo y el coeficiente de rugosidad de las paredes del canal, también se requiere la información topográfica de cada una de las secciones transversales del arroyo.

La topografía para el área de estudio se obtuvo a partir de un modelo digital del terreno (MDT) con una alta resolución correspondiente a un área de 5 por 5 metros, en este caso conocida como LIDAR por sus siglas en inglés *Light Detection and Ranging*, misma que se obtuvo del INEGI para la zona urbana de Ensenada.

La modelación hidráulica empleando la topografía, obtenida a partir del modelo digital LIDAR, mostró que el área evaluada no se inundaba con la intensidad de precipitación considerada, sin embargo, del conocimiento que se tiene registrado de las inundaciones ocurridas en la zona, se procedió a realizar otro análisis a partir de un MDT con mayor resolución (0.1 m x 0.1 m). Dicho modelo, fue elaborado por medio de fotogrametría digital, mediante el uso de drones y el empleo del *software* Agisoft en su versión del año 2018.

Como resultado, se representó de manera comparativa la modelación de las áreas de inundación obtenidas de los dos modelos de terreno (figura 4). De la comparación, se seleccionó el modelo de terreno construido empleando drones para la generación de los mapas con las áreas de inundación para periodos de retorno de 25, 50 y 100 años.

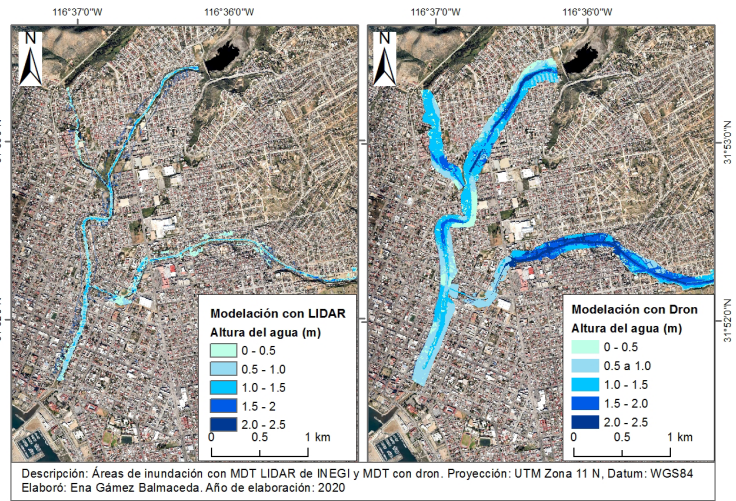
Como información adicional a las guías del CENAPRED, en la modelación hidráulica se incluyó el resultado de la velocidad del agua, el cual constituye un parámetro importante para la evaluación de la vulnerabilidad física en las viviendas. Un ejemplo de ello se presenta en la Figura 5, con los mapas de amenaza por inundación para un periodo de 100 años con el MDT seleccionado.

Cuadro 1. Caudales máximos para distintos periodos de retorno (Tr) en las subcuencas de los arroyos de estudio

Subcuenca de arroyos evaluados	Área (km ²)	Lluvia (mm) Tr = 25 años	Lluvia (mm) Tr = 25 años	Lluvia (mm) Tr = 25 años	Caudal (m ³ /s) Tr = 25 años	Caudal (m ³ /s) Tr = 50 años	Caudal (m ³ /s) Tr = 100 años
Bronce	5.98	29.06	32.43	35.79	15.2	18.1	21.0
Presa ELZ	6.81	29.79	33.24	36.69	20.8	24.2	27.7
Cañón DP	10.14	27.43	30.60	33.78	3.7	5.7	8.1

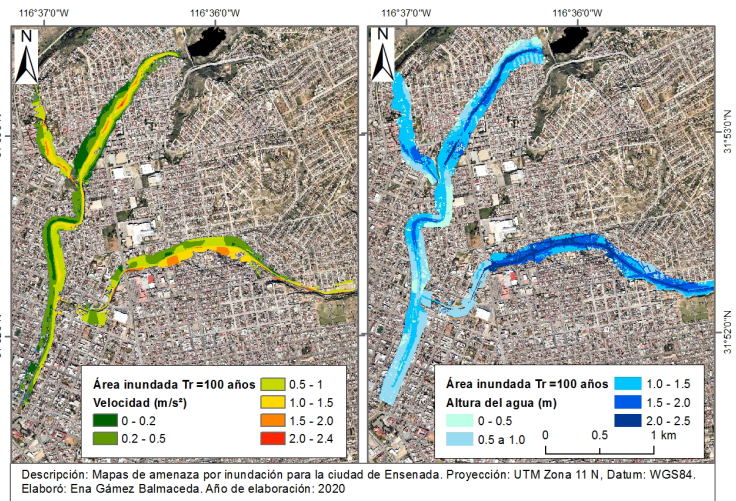
Fuente: elaboración propia con base en los resultados de la modelación hidrológica.

Figura 4. Comparación de áreas inundadas, obtenidas con el uso de dos modelos digitales del terreno para un periodo de 100 años



Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Mapas de amenaza por inundación para un periodo de retorno de 100 años, generado con un modelo de terreno construido empleando drones



Fuente: elaboración propia.

Exposición

A partir de los mapas de amenaza se determinan los elementos expuestos en las áreas inundadas, que corresponden a la población y sus bienes (figura 6.a). La información de partida para esta evaluación está integrada por la información cartográfica tomada de las bases de datos del INEGI para los censos de 2010 y 2015.

Se observó que algunas manzanas y viviendas del censo del 2015 no aparecían en el censo del 2010, además, con ayuda de las imágenes satelitales de Google Earth, se observó que algunas manzanas y viviendas no aparecían en ninguno de los dos censos, por lo tanto, la información faltante se completó con imágenes de Google Earth del año 2020 y datos de campo (figura 6.b), esta misma plataforma se aprovechó para hacer un levantamiento de información acerca del material de techos, paredes y pisos de las viviendas respectivamente, tal como se indica en las guías de CENAPRED. El total de viviendas encontradas en el área de inundación de los tres arroyos estudiados fue de 1,609.

Figura 6. Viviendas en áreas de inundación. Figura 6.a) Ortofoto obtenida de Google Earth 2020. Figura 6.b) Fotografía levantada en campo



Fuente: elaboración propia.

Una vez que se ha completado el inventario de viviendas expuestas, se determina la severidad de la amenaza o nivel de peligro que experimentan, tomando en cuenta el dato de altura y velocidad del agua en el canal (Alcocer-Yamanaka, Rodríguez-Varela, Bourguett-Ortiz, Llaguno-Guilberto, & Albornoz-Góngora, 2016; FEMA, 2018). La clasificación de la severidad de la amenaza se muestra en el Cuadro 2, el cual se utiliza para asignar a cada vivienda el nivel de amenaza, desde baja hasta extrema, cuando se combinan estos datos en un sistema de información geográfica; donde las viviendas se representan por una capa vectorial de puntos que se traslapan sobre las capas ráster de altura y velocidad del agua, obtenidas de los mapas de amenaza para cada periodo de retorno. El Cuadro 3 muestra el resultado de las viviendas expuestas a diferentes niveles de amenaza clasificadas por colores, mismos que se asignaron a las viviendas para represen-

tarlas gráficamente, como se muestra en el ejemplo de la Figura 7. De acuerdo a FEMA (2018), los daños estructurales se esperan a partir de una severidad muy alta, dependiendo del tipo de estructura.

Cuadro 2. Criterios de severidad de la amenaza por inundación (FEMA, 2018)

Clasificación de severidad de la amenaza	Rango de altura x velocidad del agua (m ² /s)
Baja	< 0.2
Media	0.2 – 0.5
Alta	0.5 – 1.5
Muy alta	1.5 – 2.5
Extrema	> 2.5

Cuadro 3. Total de viviendas expuestas a diferentes niveles de amenaza para cada periodo de retorno (Tr)

Severidad de la amenaza		Viviendas expuestas en los tres arroyos	
	Tr = 25 años	Tr = 50 años	Tr = 100 años
Nula	628	464	0
Baja	671	730	957
Media	170	180	250
Alta	99	186	274
Muy alta	40	35	94
Extrema	1	14	34
Total de viviendas	1,609	1,609	1,609

Fuente: elaboración propia con base en los mapas de amenaza.

Figura 7. Ejemplo de viviendas expuestas en al arroyo Bronce para un periodo de retorno de 100 años, con base en el Cuadro 3. Los polígonos representan las manzanas y los puntos de colores representan las viviendas en cada nivel de amenaza, desde media en color verde hasta extrema en color rojo



Fuente: elaboración propia.

Esta parte del proceso constituye el modelo de exposición. Sin embargo, la severidad de la amenaza no es suficiente para asegurar si una vivienda es vulnerable, ya que su vulnerabilidad dependerá del tipo de construcción; por ejemplo, una vivienda de mampostería o concreto no responde igual a una vivienda de madera ante una misma velocidad y altura del agua, ya que no tienen la misma cimentación. La estructura de cualquier vivienda experimentará fuerzas hidrostáticas ante la altura del agua y fuerzas hidrodinámicas con la velocidad, si no tiene una cimentación rígida, esta se moverá considerablemente hasta un posible colapso (John P. Fisher, Antonios G. Mikos, 2012).

Por consiguiente, se procede a hacer una clasificación de las 1609 viviendas, con los datos levantados en campo, de acuerdo a las guías de CENAPRED, tanto para su estructura construida como nivel socioeconómico. Se encontraron cuatro tipos constructivos que representan las viviendas en las áreas de amenaza por inundación. Un ejemplo de cada tipo de vivienda se muestra en la Figura 8. De esta manera el modelo de exposición cuenta con los datos suficientes para evaluar la vulnerabilidad. El resultado fue:

- 168 viviendas de material ligero
- 302 viviendas de madera
- 847 viviendas de mampostería de un piso y
- 292 viviendas de mampostería de dos pisos

Figura 8. Tipo de construcción en viviendas aledañas a los arroyos del estudio

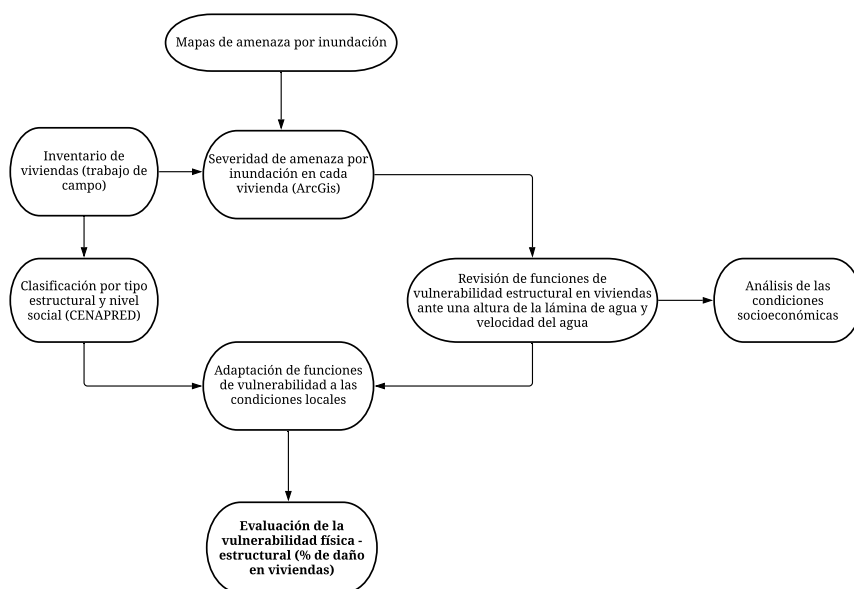
	
Vivienda de material ligero	Vivienda de madera
	
Vivienda de mampostería de un piso	Vivienda de mampostería dos pisos

Fuente: las fotos se tomaron en campo y la clasificación fue con base en las guías de CENAPRED.

Vulnerabilidad

Una vez que se tiene el modelo de exposición, el siguiente paso es la evaluación de la vulnerabilidad física de las viviendas, que incluye a la estructura y su contenido. El proceso para la evaluación de la vulnerabilidad con los datos de exposición se resume en la Figura 8.

Figura 9. Proceso para la evaluación de la vulnerabilidad física-estructural en viviendas



Fuente: elaboración propia.

La vulnerabilidad se evalúa para determinar el nivel de daño latente que experimentarán las viviendas. Uno de los métodos más confiables para la evaluación de la vulnerabilidad a nivel global son las funciones de vulnerabilidad, que son elaboradas por un grupo de expertos en evaluación de daños, mediante el análisis del parámetro físico de la amenaza y el daño producido en todos los eventos históricos (FEMA, 2017).

Las guías de CENAPRED proporcionan las funciones de vulnerabilidad para el menaje o contenido de la vivienda clasificada por su tipo de construcción y altura de agua, las cuales serán usadas para determinar el porcentaje de daño al menaje de las viviendas. En esas guías aún no se encuentran funciones de vulnerabilidad para evaluar el daño estructural de la vivienda; sin embargo, presentan un índice

de vulnerabilidad asociado a la tipificación de la vivienda. Por esa razón, se decidió investigar sobre las funciones de vulnerabilidad estructural.

Existen publicaciones de carácter internacional que han evaluado la vulnerabilidad de las estructuras civiles por medio de modelos matemáticos, se basan en las especificaciones de diseño, material de construcción y los parámetros de la amenaza (Escuder-Bueno *et al.*, 2012; FEMA, 2016; Marvi, 2020; Scawthorn *et al.*, 2006; United States Army Corps of Engineers, 2006). Las funciones de vulnerabilidad de la literatura se tomaron como referencia para seleccionar y adaptar las curvas de vulnerabilidad que fueran aplicables a la zona de estudio.

Para seleccionar las funciones de vulnerabilidad para la ciudad de Ensenada se hizo un análisis de las características socioeconómicas y culturales, con el fin de conocer el diseño y construcción que elige la población de acuerdo con sus necesidades, usos y costumbres. En este contexto, se encontró que por ser una zona fronteriza y su estrecha relación con Estados Unidos, desde hace un siglo ha sido el foco de atención para la migración hacia esta zona (González Gómez, 2008).

Sin embargo, hay mitos y realidades sobre la situación de la ciudad. A pesar de que existe un ingreso per cápita mayor al de algunas ciudades del resto del país, también existe situación de pobreza. Muchas familias han migrado a esta zona en busca de un mejor desarrollo, y han construido sus viviendas de diferentes maneras, o compran casas móviles procedentes de Estados Unidos, que son hechas de madera y de muy baja calidad (Jardón Hernández & Ordóñez Barba, 2009; Ortega Villa, 2000; Peña Muñoz, 2020).

Por otro lado, las personas que empezaron a poblar la ciudad, al igual que sus descendientes, procuran conservar el patrimonio histórico y el tipo de construcción en las viviendas, con un parecido californiano del país vecino tanto en edificios importantes y viviendas, las cuales corresponden a construcciones de madera y mampostería principalmente (Calderón, Robles, & Aguilar, 2015).

Con base en el análisis anterior se decidió usar las funciones de vulnerabilidad, que evalúan el colapso de la estructura ante una altura y velocidad del agua desarrolladas por el Cuerpo de Ingenieros de Estados Unidos, mostradas en la Figura 10 (FEMA, 2001).

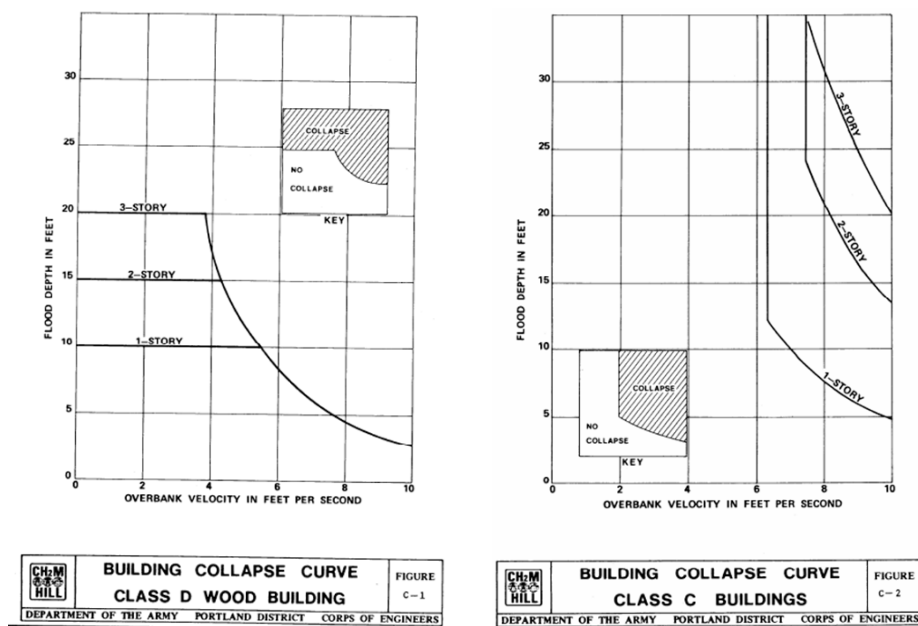
Para evaluar el daño en el exterior de las viviendas, se tomó en cuenta solo la altura del agua, se hizo una comparación de las funciones de vulnerabilidad desarrolladas en algunos países y condados de Estados Unidos (Balasbaneh, Abidin, Ramli, Khaleghi, & Marsono, 2020; De Risi *et al.*, 2020; Hasanzadeh Nafari, Ngo, & Lehman, 2016; Huizinga, de Moel, & Szewczyk, 2017; United States Army Corps of Engineers, 2006).

De la comparación se hizo un promedio de las funciones para viviendas similares con las construcciones de la ciudad de Ensenada (figura 11). Estas funciones

se aplicaron a las 1,609 viviendas que se encuentran en el área de inundación de los tres arroyos. Como resultado se encontró el porcentaje de daño que experimenta la estructura de la vivienda ante la severidad de la amenaza, al aplicar las funciones de la Figura 10, y el daño exterior de la vivienda ante una altura de la lámina del agua cuando se aplican las curvas de vulnerabilidad de la Figura 11. El porcentaje de daño está relacionado con el nivel de vulnerabilidad, que va desde baja si presenta daños de 0 a 25%, hasta muy alta o colapso si presenta el 100% de daños. Este criterio se tomó de USACE (2006), y se presenta como la relación de la vulnerabilidad y porcentaje de daño de las viviendas estudiadas en el Cuadro 4.

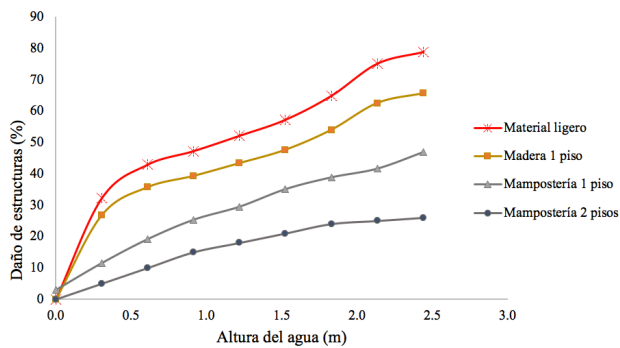
Los cuadros del 5 a 7 muestran el resultado de la cantidad de viviendas que resultan vulnerables ante la amenaza por inundación para cada periodo de retorno, cuando se aplican las funciones de vulnerabilidad de las figuras 10 y 11. Algunas estructuras de madera y de material ligero resultaron con vulnerabilidad alta y colapsos ante la amenaza de los periodos de retorno de 50 y 100 años, esto también indica pérdidas materiales al interior de la vivienda. Los resultados de los daños y los costos de la vulnerabilidad estructural, así como del menaje, se presentan en la evaluación del riesgo.

Figura 10. Funciones de colapso para estructuras de madera y mampostería



Fuente: FEMA (2001).

Figura 11. Funciones de vulnerabilidad propuesta para las viviendas de la ciudad de Ensenada, B. C.



Fuente: elaboración propia con base en el análisis de las funciones de USACE (2006).

Cuadro 4. Vulnerabilidad y porcentaje de daño estimado para cada tipo de estructura

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería dos pisos
Baja	0 – 25 %	0 – 25 %	0 – 25 %	0 – 25 %
Media	25 – 50%	25 – 50%	25 – 41%	-
Alta	50 – 70%	50 – 59%	-	-
Muy alta (colapso)	100%	100%	-	-

Fuente: elaboración propia con base en las figuras 10 y 11, datos de amenaza y datos de exposición.

Cuadro 5. Resultado de viviendas vulnerables ante la amenaza por inundación para un periodo de retorno de 25 años

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería dos pisos
Nula	53	120	334	121
Baja	58	99	367	171
Media	22	39	146	0
Alta	35	44	0	0
Colapso	0	0	0	0
Total	168	302	847	292

Fuente: elaboración propia.

**Cuadro 6. Resultado de viviendas vulnerables ante la amenaza por inundación
para un periodo de retorno de 50 años**

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería dos pisos
Nula	54	113	305	100
Baja	27	33	373	192
Media	42	132	169	0
Alta	41	24	0	0
Colapso	4	0	0	0
Total	168	302	847	292

Fuente: elaboración propia.

**Cuadro 7. Resultado de viviendas vulnerables ante la amenaza por inundación
para un periodo de retorno de 100 años**

Vulnerabilidad	Material ligero	Madera	Mampostería	Mampostería dos pisos
Baja	22	65	433	292
Media	56	190	414	0
Alta	81	46	0	0
Colapso	9	1	0	0
Total	168	302	847	292

Fuente: elaboración propia.

Evaluación Integral del Riesgo

El riesgo se evalúa con la cuantificación de las pérdidas que resultan por los daños ocasionados por la amenaza. Para esta evaluación se tomaron como ejemplo los métodos que evalúan pérdidas en México, relacionados con la vulnerabilidad física de las viviendas, en términos ingenieriles y con base a las guías de CENAPRED (Alcocer-Yamanaka *et al.*, 2016; Fuentes Mariles, Franco, Luna Cruz, & Moralez Rodríguez, 2014).

Estos métodos se resumen en el cálculo del valor material de la estructura y su contenido por el porcentaje de daño obtenido a partir de las funciones de vulnerabilidad. Para el cálculo de los daños en el menaje de las viviendas (según la tipificación de las guías del CENAPRED), se hizo un ajuste en la cantidad de enseres que acostumbra la población.

Dentro de las características socioeconómicas y culturales en esta zona fronteriza, y de los datos levantados en campo, las viviendas de materiales ligeros y de madera se clasificaron como tipo II y III, que corresponden a las viviendas autoconstruidas con materiales de baja calidad. Adicionalmente, se encontró que la mayoría de estas viviendas poseen automóvil y un poco más de enseres de lo que se reporta para las viviendas de esta clasificación en las guías del CENAPRED.

Sin embargo, el costo de adquisición es mucho menor que en el resto del país, ya que existe la cultura de compras de todo tipo de objetos de segunda mano y bajo costo, provenientes de Estados Unidos, entre los que se incluye ropa, juguetes, electrodomésticos, muebles, automóviles, casas móviles, entre otros.

El 90% de la población del estado de Baja California compra bienes usados o nuevos de Estados Unidos (Ortega, 2000). Esta situación contribuye al aumento del riesgo respecto a las casas móviles traídas de allá, ya que corresponden a diseños antiguos e inseguros, que ya no se fabrican porque representan un riesgo ante terremotos (FEMA - ATC, 2019).

Las viviendas de mampostería se clasificaron como:

- Tipo III: corresponden a las de un piso, se observó que fueron autoconstruidas.
- Tipo IV: son viviendas de un piso bien construidas.
- Tipo V: corresponden a viviendas de dos o más pisos con cimentación rígida.

Los costos del menaje fueron consultados directamente por las tiendas físicas y virtuales de la ciudad de Ensenada, mientras que el estimado del menaje para cada tipo de vivienda se muestra en el Cuadro 8. Para el cálculo de los daños estructurales de la vivienda, se consultó el valor de la construcción aplicable en la ciudad, en fuentes diversas: inmobiliarias de Ensenada, aseguradoras del Ayuntamiento de Tijuana y Ensenada, departamento de Obras Públicas de Ensenada, Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (INFONAVIT), Instituto para el Desarrollo Inmobiliario y de la Vivienda en Ensenada (INDIVI), Programa Sectorial de vivienda de Baja California y el reglamento de la ley de edificaciones para el municipio de Ensenada. De las fuentes consultadas se estimó un valor promedio para cada tipo de construcción, el cual se muestra en el Cuadro 9.

Una vez que se tiene el valor estimado del menaje de la vivienda se aplican las funciones de vulnerabilidad de las guías del CENAPRED, las cuales relacionan el porcentaje de pérdida de enseres para cada tipo de vivienda ante una altura del agua. Este porcentaje se multiplica por el valor estimado del menaje de la vivienda para obtener las pérdidas monetarias. De igual manera, se multiplica el valor estimado del costo estructural de la vivienda por el porcentaje de daño obtenido con

las funciones de las figuras 10 y 11 para obtener las pérdidas monetarias por daños estructurales, que equivale a decir el costo de reconstrucción. La suma de las pérdidas por daños estructurales y los daños en el menaje de la vivienda constituyen las pérdidas económicas directas de la vivienda ante la amenaza por inundación. A estas pérdidas se les considera el riesgo por inundación en las viviendas. El resultado de las pérdidas estimadas en las viviendas para cada periodo de retorno se muestra en el Cuadro 10.

Cuadro 8. Valor estimado del costo del menaje en viviendas de Ensenada

Vivienda	Costo del menaje
Tipo II	\$62,200.00
Tipo III	\$187,222.00
Tipo IV	\$373,200.00
Tipo V	\$559,800.00

Fuente: elaboración propia con base en la consulta de precios locales.

Cuadro 9. Valor estimado del costo de construcción en viviendas de Ensenada

Tipificación de vivienda	Costo de construcción
Material ligero (Tipo II)	\$100,000.00
Madera (Tipo III)	\$185,000.00
Mampostería (Tipo III)	\$208,512.00
Mampostería (Tipo IV)	\$328,774.40
Mampostería (Tipo V)	\$707,760.00

Fuente: elaboración propia con base al valor promedio del costo de construcción local.

Cuadro 10. Pérdidas económicas por daños esperados en viviendas para diferentes periodos de retorno

Daños en viviendas	Costo M.N (Tr = 25 años)	Costo M.N (Tr = 50 años)	Costo M.N (Tr = 100 años)
Daño estructural	\$16,561,532	\$48,807,549	\$98,735,633
Daño menaje	\$16,531,174	\$59,413,637	\$125,582,560
Daño total	\$33,092,706	\$108,221,185	\$224,318,192

Fuente: elaboración propia con base en las funciones de vulnerabilidad y los cuadros 8 y 9.

El cálculo de las pérdidas materiales es un dato importante para la toma de decisiones y la gestión de riesgo. Las autoridades municipales deben conocer esta información para analizar si se enfrentan a un desastre, y si tienen la capacidad para enfrentar el riesgo o necesitarán solicitar ayuda externa.

Adicionalmente, para la gestión de riesgo, además de la evaluación de las pérdidas materiales, es necesaria una evaluación integral del riesgo, que incluye la identificación de estructuras críticas o de servicios en las zonas inundables, el impacto humano, personas heridas o que necesiten refugio temporal, así como el impacto físico en la infraestructura, el impacto económico y la determinación de prioridades, donde se identifican las zonas que requieren mayor atención a la emergencia. Esta información es de suma importancia para el sector operativo (protección civil, bomberos, seguridad pública).

La identificación de las estructuras críticas y las calles inundadas se logró con ayuda de imágenes de Google Earth de 2020 y datos de INEGI. En el Cuadro 11 se muestra el ejemplo de las estructuras identificadas, las calles inundadas representan la severidad de arrastre vehicular por la velocidad del agua mostrada en los mapas de amenaza; este es un problema recurrente que atienden autoridades de Protección Civil municipal. El impacto económico se determinó con la información del Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE) de INEGI, en el cual se encontraron 249 viviendas con actividad económica y 7 predios de servicios en las áreas de inundación, con un total de 1,700 trabajadores. Por lo tanto, se estima la interrupción del ingreso diario de estos trabajadores.

La determinación de prioridades se analiza con la información de la vulnerabilidad social. Por ejemplo, en el caso hipotético de que se presentaran los daños esperados para un periodo de 25 años, donde el municipio no tuviera los 33 millones de pesos que se necesitan, y solo contara con 10 millones de pesos para ayudar a la población afectada, tendría que decidir a quienes priorizar. En ese caso, el mapa de vulnerabilidad social, que se está relacionado con los indicadores de pobreza y de desarrollo, puede indicar donde se encuentra la población más vulnerable socialmente hablando.

El mapa de vulnerabilidad social se elaboró con el método del Sistema Nacional para el Desarrollo Integral de la Familia (DIF, 2017) y con datos del censo de población y vivienda de INEGI, de 2010 y 2015. Las manzanas con viviendas que tienen todos los indicadores de rezago social se clasifican con vulnerabilidad alta, las que tienen 60% de los indicadores vulnerabilidad media y el 30% de los indicadores vulnerabilidad baja.

El mapa de la Figura 12 indica que en cada manzana hay viviendas vulnerables, pero no todas las viviendas de la manzana tienen el mismo grado de vulnerabilidad. Ahí mismo se muestra el ejemplo para la determinación de prioridades

con los resultados del impacto social, obtenido de las viviendas con vulnerabilidad estructural alta y extrema para el periodo de retorno de 100 años. A partir del mapa de la Figura 12, con la combinación de los datos de viviendas con los datos del censo de INEGI, por medio de un sistema de información geográfica, se obtienen los resultados del impacto social para la determinación de prioridades. El Cuadro 12 muestra el ejemplo del impacto social, obtenido de las viviendas con vulnerabilidad estructural alta y extrema para el periodo de retorno de 100 años.

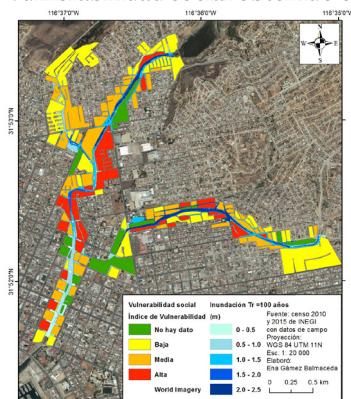
Cuadro 11. Identificación de estructuras críticas en zonas propensas a inundarse

	Estructuras críticas 1 Edificio de bomberos 2 Edificios de Seguridad pública 3 Escuelas 1 Edificio de la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada 7 Calles inundadas: a. Arroyo Bronce (11, Tamaulipas y Luis Calzada Ocampo) b. Arroyo Presa (7ma, 8va, y 12) c. Arroyo Cañón DP (12 y Ámbar
---	---

Fuente: foto obtenida de Google Earth.

En la foto se observa una estación de bomberos y una estación de policía junto al arroyo.

Figura 12. Mapa de vulnerabilidad social obtenido con datos de INEGI



Fuente: elaboración propia con base en la metodología del DIF.

Cuadro 12. Vulnerabilidad social e impacto humano para un periodo de retorno de 100 años

Grado de vulnerabilidad social por manzana	Total de viviendas inundadas	Personas en zonas de peligro	Personas socialmente vulnerables	Heridos en viviendas con daños mayores	Damnificados que necesitarán albergue
Alta	511	2 801	385	28	82
Media	619	3 550	394	0	34
Baja	381	4 129	262	8	21
No hay dato	98			0	15
Total	1 609	10 480	1 041	36	152

Fuente: elaboración propia con base en los resultados de daños y el censo de INEGI 2010 y 2015.

Los resultados de este trabajo son un ejemplo representativo de la evaluación integral del riesgo por el impacto de inundaciones, el escenario de lo que pasaría con la población vecina a dichos cauces temporales de la ciudad de Ensenada y sus bienes, si las condiciones del sistema no cambian.

Cabe mencionar que en esta evaluación solo se consideró el impacto directo, no se han considerado los daños indirectos. Sin embargo, se proporciona información útil para los actores que participan en la gestión de riesgo.

La gestión de riesgo requiere de la coordinación entre sector público, académico y de la comunidad. Es importante que se tome conciencia de lo que ocurriría si se presentan estas precipitaciones, si no se informa sobre la importancia de los requerimientos mínimos de construcción, o la seguridad estructural de las viviendas.

De igual manera, se debe contar con un sistema de alerta temprana, para que las autoridades puedan alertar con tiempo a la población de lo que sucedería cuando ocurran las lluvias consideradas en las modelaciones hidrológicas. Por otro lado, en el contexto de la Ley de Protección Civil de Baja California, el reglamento de edificaciones de Ensenada y el Plan de Desarrollo Urbano del municipio, se establece que no está permitido construir en zonas de riesgos, por lo tanto, se debe buscar que se ejecuten medidas óptimas de planeación de ordenamiento territorial para evitar que se construya en zonas de riesgo.

Conclusiones

La evaluación del riesgo es un proceso complejo, que requiere una evaluación detallada de cada uno de sus elementos y su integración con un análisis conjunto

para un mejor entendimiento y buena gestión. En esta evaluación se abordó la integración de la amenaza, la vulnerabilidad relacionada a posibles escenarios de daño para cada vivienda, el impacto humano, pérdidas materiales, impacto socio-económico y la determinación de prioridades.

La calidad de los datos proporciona una apropiada evaluación del riesgo, aunque se disponga de datos oficiales, se recomienda su revisión y actualización. Como ejemplo, para la zona de estudio se actualizaron los datos de precipitación y modelo de terreno en el arroyo, para la evaluación de la amenaza. Otro ejemplo son las bases de datos del INEGI, tienen gran cobertura y calidad, sus datos son muy útiles para hacer una estimación del riesgo; sin embargo, se encontró que algunas áreas no están cubiertas en su totalidad. Por lo tanto, se complementaron con datos de campo.

La evaluación de la vulnerabilidad proporciona el daño estimado para los distintos tipos de construcción, de tal manera que se espera concientizar a la población antes de decidir construir en zonas propensas a inundarse. Las viviendas de materiales ligeros y de madera son las más vulnerables, corresponden a las viviendas autoconstruidas en asentamientos informales y casas móviles; la compra de estas casas móviles resultó ser la compra de un riesgo latente. Las viviendas con mayor vulnerabilidad estructural se catalogan con vulnerabilidad social alta, por lo tanto, se encuentran en mayor desventaja al sufrir los daños por inundación. En contraste, las viviendas de mampostería con cimentación rígida son resistentes a la amenaza.

Las guías del CENAPRED son muy importantes para la elaboración de los atlas de riesgos, y fueron usadas para el desarrollo de este estudio con la actualización de los métodos y datos mencionados. Por lo tanto, se promueve su uso, con el complemento del aporte científico de los aspectos físicos, geográficos sociales y culturales que caracterizan a cada ciudad. Asimismo, se recomienda que se incorporen funciones de vulnerabilidad estructural en sus guías para cada tipificación de viviendas de México.

Referencias bibliográficas

- Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Albornoz-Góngora, P. M. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, VII(5), 33–55.
- Balasbaneh, A. T., Abidin, A. R. Z., Ramli, M. Z., Khaleghi, S. J., & Marsono, A. K. (2020). Vulnerability assessment of building material against river flood water: Case study in Malaysia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 476(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/476/1/012004>
- Calderon, C., Robles, C., & Aguilar, C. (2015). Patrimonio cultural en Ensenada, México. Itinerario y preservación. *Revista de Arquitectura, Urbanismo y Territorios*, V(I), 1–27.
- CENAPRED. (2006). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Municipales y Estatales de Peligros y Riesgos*.
- CENAPRED. (2014). *Diagnóstico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México. Atlas Nacional de Riesgos de la República Mexicana* (Vol. 1).
- COPLADE, (Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado). (2017). Enero 2017. *Publicaciones Sociodemográficas/Baja California*, (55), 1–8. Recuperado de: <http://www.copladebc.gob.mx/publicaciones/2017/Mensual/Ensenada2017.pdf>
- CRED, C. para el R. en el E. de D. (2020). Disaster* Year in Review 2019. *Cred*, (58), 1–2. Retrieved from https://www.emdat.be/publications?field_publication_type_tid=All
- De Risi, R., Jalayer, F., De Paola, F., Carozza, S., Yonas, N., Giugni, M., & Gasparini, P. (2020). From flood risk mapping toward reducing vulnerability: the case of Addis Ababa. *Natural Hazards*, 100(1), 387–415. <https://doi.org/10.1007/s11069-019-03817-8>
- DIF, S. N. para el D. I. de la F. (2017). *Índice de Vulnerabilidad Social. Dirección General de Alimentación y Desarrollo Comunitario*.
- Escuder-Bueno, I., Castillo-Rodríguez, J. T., Zechner, S., Jöbstl, C., Perales-Momparler, S., & Petaccia, G. (2012). A quantitative flood risk analysis methodology for urban areas with integration of social research data. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12(9), 2843–2863. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-2843-2012>
- FEMA. (2001). *Multi-hazard Loss Estimation Methodology Flood Model – Hazus-MH*. Recuperado de: https://www.fema.gov/media-library-data/20130726-1820-25045-8292/hzmmh2_1_fl_tm.pdf
- FEMA. (2016). *Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping*, 1 (Mayo) 1–29.

- FEMA. (2017). Substantial Damage Estimator (SDE) Manual del usuario.
- FEMA. (2018). Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping Flood Risk Map, (February). Retrieved from https://www.fema.gov/media-library-data/1520966727438-8c05ecc18e141449aa79665641bd9fe3/Flood_Risk_Map_Guidance_Feb_2018.pdf
- FEMA - ATC, N. (2019). *Improving Earthquake Performance of Manufactured Homes*. (A. T. Council, Ed.) (Applied Te). California. Recuperado de: <https://cloud.atcouncil.org/s/6KNtXC3H8xz3yg6#pdfviewer>
- Fuentes Mariles, O., Franco, V., Luna Cruz, L., & Moralez Rodríguez, H. (2014). *CARACTERIZACIÓN FLUVIAL E HIDRÁULICA DE LAS INUNDACIONES EN MÉXICO*. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/153086/CARACTERIZACION_FLUVIAL_E_HIDRULICA_DE_LAS_INUNDACIONES_EN_MEXICO_VERACRUZ_INFORME_FINAL1de2.pdf
- Gámez-Balmaceda, E., López-Lambrano, A. A., Seingier, G., & López-Ramos, A. (2019). Determinación de Áreas de Inundación en la Ciudad de Ensenada B.C y Su importancia en la Planeación de un Sistema de Alerta Temprana Ante Eventos Hidrometeorológicos y Climáticos. *Quehacer Científico En Chiapas*, 14(2), 81–91.
- Gámez-Balmaceda, E., López-Ramos, A., Martínez-Acosta, L., Medrano-Barboza, J. P., López, J. F. R., Seingier, G., ... López-Lambrano, A. A. (2020). Rainfall intensity-duration-frequency relationship. Case study: Depth-duration ratio in a semi-arid zone in Mexico. *Hydrology*, 7(4), 1–22. <https://doi.org/10.3390/hydrology7040078>
- González Gómez, O. (2008). *Territorio de la producción mundial*.
- Hasanzadeh Nafari, R., Ngo, T., & Lehman, W. (2016). Calibration and validation of FLFars-A new flood loss function for Australian residential structures. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(1), 15–27. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-15-2016>
- Huizinga, J., de Moel, H., & Szewczyk, W. (2017). *Global flood depth-damage functions : Methodology and the Database with Guidelines*. Joint Research Centre (JRC). <https://doi.org/10.2760/16510>
- INEGI. (1995). Estudio Hidrológico del Estado de Baja California, 79. Recuperado de: http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825221560/702825221560_1.pdf
- Jardón Hernández, A. E., & Ordóñez Barba, G. (2009). Vivienda para los pobres: instrumentación e impactos del programa Tu Casa en la ciudad de Tijuana. *Estudios Fronterizos*, 10(19), 157–181. Recuperado de: http://scielo.unam.mx/scielo.php?pid=S0187-69612009000100005&script=sci_arttext

- John P. Fisher, Antonios G. Mikos, J. D. B. and D. R. P. (2012). Engineering: Principles and Practices for Retrofitting Flood-Prone Residential Structures, (January), 771. Recuperado de: <http://books.google.com/books?id=KxNJ1vn2gzcC&pgis=1>
- López-Lambrano, A. A., Martínez-Acosta, L., Gámez-Balmaceda, E., Medrano-Barboza, J. P., Remolina López, J. F., & López-Ramos, A. (2020). Supply and Demand Analysis of Water Resources. Case Study: Irrigation Water Demand in a Semi-Arid Zone in Mexico. *Agriculture*, 10(8), 333. <https://doi.org/10.3390/agriculture10080333>
- Marvi, M. T. (2020). A review of flood damage analysis for a building structure and contents. *Natural Hazards*, 102(3), 967–995. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-03941-w>
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2011). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Texas Water Resources Institute*, 1–647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>
- Ortega Villa, G. (2000). Satisfacción de necesidades básicas en Baja California: mitos y realidades. *Estudios Fronterizos*, 1(1), 9–45. <https://doi.org/10.21670/ref.2000.01.a01>
- Pedraza Díaz, A. (2014). *Evaluación De La Vulnerabilidad Urbana Y Resiliencia Ante Lluvias Intensas En La Ciudad De Ensenada, B.C.* El Colegio de la Frontera Norte. <https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>
- Peña Muñoz, J. J. (2020). Migrantes En Baja California Vulnerabilidad y Riesgos. *Migrants In Countries In Crisis Initiative (MICIC)*. Recuperado de: https://micicinitiative.iom.int/sites/default/files/resource_pub/docs/estudiobjweb.pdf
- Rodríguez Esteves, J. (2007). Construcción social del riesgo y variabilidad climática. *Frontera Norte*, 19(37), 83–112.
- Scawthorn, C., Flores, P., Blais, N., Seligson, H., Tate, E., Chang, S., ... Lawrence, M. (2006). HAZUS-MH Flood Loss Estimation Methodology. II. Damage and Loss Assessment. *Natural Hazards Review ASCE*, 7(2), 72–81. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1527-6988\(2006\)7](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1527-6988(2006)7)
- SEDATU. (2016). Términos de Referencia para la Elaboración de Atlas de Peligros y/o Riesgos 2016. Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano.
- Soares, J., Blanco, R., García, C., Inzunza, E., & Rousseau, P. (2011). Flooding tendencies for the city of Ensenada, Baja, California, Mexico, 1948–2004. *Interventions for Academic and Behavior Problems II: Preventive and Remedial Approaches*, 52, 129–137. <https://doi.org/doi:10.2495/978-1-84564-6-1/46212>
- Torres Navarrete, C. R., García Toscano, J., Larios Castillo, S. I., Pacheco Ruíz, I., Correa Sandoval, F., & Gálvez Télles, A. (2012). Atlas de riesgos naturales del municipio de Ensenada 2012, (646), 174. Recuperado de: http://www.anr.gob.mx/Docs/2011/vr_02001_AR_ENSENADA.pdf

- U.S. Army Corps of Engineers. (2017). Hydrologic Modeling System; Application Guide, (June), 158.
- UNISDR. (2009). 2009 UNISDR Terminología sobre Reducción del Riesgo de Desastres. *Estrategia Internacional Para La Reducción de Desastres de Las Naciones Unidas (UNISDR)*, 43.
- United States Army Corps of Engineers. (2006). US Army Corps of Engineers New Orleans District. FINAL REPORT DEPTH-DAMAGE RELATIONSHIPS FOR STRUCTURES, CONTENTS, AND VEHICLES AND CONTENT-TO-STRUCTURE VALUE RATIOS (CSV) IN SUPPORT OF THE DONALDSONVILLE TO THE GULF, LOUISIANA, FEASIBILITY STUDY, (Marzo), 84. Recuperado de: <http://www.mvn.usace.army.mil/Portals/56/docs/PD/Donaldsv-Gulf.pdf>

Capítulo IV

Variación del clima para Veracruz en los últimos 10 años enfocado a actividades agropecuario-ecológicas

*Jorge Humberto Bravo Méndez*¹, *Saúl Miranda Alonso*²
^{1,2} Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz.
Dirección electrónica: jh.herk@gmail.com

Resumen

La Secretaría de Protección Civil del Estado de Veracruz (SPC-Ver), a través de la Coordinación del Centro de Estudios y Pronósticos Meteorológicos (CCEPM), desarrolló productos climáticos para Veracruz como apoyo a las comunidades, para que tomen decisiones en el manejo de sus actividades agropecuario-ecológicas.

Estos productos son mapas climáticos mensuales del periodo 1981-2010 y mapas mensuales del clima promedio en diez años, del periodo 2010-2019. Se cubren las variables precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima.

Haciendo una sustracción de los valores climatológicos mensuales (30 años) con los valores mensuales de clima promedio (10 años), se obtienen mapas de anomalías, lo que nos permite dimensionar cualitativamente los cambios actuales en el clima de Veracruz.

Estos productos, al estar representados en espacio y tiempo, permiten que personal dedicado al manejo técnico de actividades como agrónomos, biólogos y otros, puedan adaptar estos resultados a necesidades específicas de producción en el campo y confort en la población, principalmente rural.

Estos resultados se entregarán al Sistema de Información Estratégica del Gobierno de Veracruz de Ignacio de la Llave (SIEVER) como productos adicionales a los pronósticos meteorológicos de la SPC-Ver que se proporcionan diariamente para alcanzar las zonas marginadas con el apoyo de emisoras de radio comunitarias, así como el uso de redes sociales.

Palabras claves: *constantes climáticas, variación del clima, zonas marginadas.*

Introducción

La Organización Meteorológica Mundial, al ser portavoz autorizado de las Naciones Unidas sobre el tiempo, el clima y el agua (OMM-1, 2016), es quien se encarga de dar seguimiento a la variación del clima, principalmente al cambio de la temperatura debido al cambio climático.

En los diferentes países, sus respectivos Servicios Meteorológicos e Hidrológicos Nacionales (SMHN), se encargan de evaluar los promedios a largo plazo y la variabilidad interanual de los principales parámetros climáticos, tales como la temperatura, la precipitación o el viento, que son importantes para los sectores sensibles al clima, como son la gestión del agua, la energía, la agricultura o la salud (OMM-2, 2019).

En los casos anteriores, los productos son mapas de escala global o a nivel país, que no pueden dar una visión a escala regional —o lo hacen de manera limitada— de los cambios de clima y a la escala local es menos visible aún.

Este trabajo se origina en una solicitud para elaborar productos climáticos de temperatura y precipitación, ajustados a un área regional con miras para el uso local, que sean recientes y de utilidad para pobladores de zonas difíciles por las variaciones del clima que afectan las actividades agropecuario-ecológicas, la salud y el confort de la población.

Se toman 20 municipios como base, considerados prioritarios, con situación económica precaria y que se sitúan desde la montaña hasta las llanuras costeras y desde el sur hasta el norte de Veracruz. Las diferencias en temperatura y precipitación entre estas zonas son notorias.

Para la producción agropecuario-ecológica el mayor problema son las variaciones de temperatura y precipitación fuera de lo esperado. A continuación, se describen algunos ejemplos recopilados de distintas pláticas con agricultores que a través del tiempo han adquirido esta experiencia y que se refieren a las variables que se analizan en este trabajo.

El exceso de precipitación puede arrastrar al suelo fértil en la montaña y con ríos de lodo sepultar sembradíos o inundar cualquier cultivo; igualmente, la falta de la precipitación esperada es dañina según la zona, 20 días sin lluvia en la montaña pueden comprometer la producción de chayote, mientras que los nopales pueden sobrevivir meses sin agua.

Las temperaturas altas no afectan mayormente a la producción de coco en la costa, pero la producción de hortalizas se puede dañar severamente.

Temperaturas bajas pueden hacer daño en mayor o menor grado, mucho si es un cítrico en zona costera, o poco si es un cultivo de papa en la montaña.

Como primer instrumento para identificar los requerimientos agroecológicos de los cultivos, se puede usar Crop Ecological Requirements Database (ECO-

CROP), el cual es una herramienta de *software* que identifica 2,568 especies de plantas para entornos y usos determinados. Esta herramienta de la FAO (2020), que se puede usar a nivel mundial, fue diseñada con información de requisitos ambientales de cultivos relativamente básica.

Para la República mexicana, se puede consultar el “Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México” (INIFAP, 2012), en el cual se pueden identificar zonas aptas para distintos cultivos.

Desde una perspectiva de agricultura familiar, existen 14 productos (maíz, frijol, chile, sorgo, trigo, avena, café, naranja, caña de azúcar, alfalfa, cacao, papa, soya y vainilla) que se pueden cultivar en distintas zonas del estado de Veracruz (SAGARPA, 2012).

En Veracruz, como en muchas partes de México, por cuestiones culturales, el maíz es altamente consumido y por tanto cosechado, y una gran cantidad de municipios tienen, media y alta “aptitud agroclimática” (SIAP, 2018).

Antecedentes

La SPC-Ver tiene como misión salvaguardar la vida, patrimonio, medio ambiente y planta productiva a través de la coordinación interinstitucional, el fortalecimiento de la cultura de prevención, la reducción de riesgo de desastres y la atención en situaciones de emergencia, respetando los derechos humanos de las personas que habitan o transitan por la entidad Veracruzana.

A través de la coordinación interinstitucional, se multiplican los resultados de los servidores públicos. La transversalización aumenta la eficacia de los preciados recursos, ya sean materiales o humanos,

El párrafo anterior aplica para este trabajo, ya que es la Secretaría de Desarrollo Agropecuario Rural y Pesca (SEDARPA) quien hará llegar los mapas climáticos a productores locales de los municipios prioritarios, la SPC-Ver, quien se ha encargado de obtener y procesar datos climáticos y de generar los mapas, y se prevé que el Instituto Veracruzano de Asuntos Indígenas apoye en la comunicación con los pueblos de lenguas originarias. Los datos climáticos tomados como base son obtenidos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Área de Estudio

Los cambios del clima para el estado de Veracruz, delimitado con la línea gris, se muestran en la Figura 1. En esta figura también se muestran las cuatro cuencas hidrológicas que incluyen al estado. La CONAGUA, a través del Organismo Cuenca Golfo Centro (OCGC), diariamente monitorea estas cuencas, y sus datos tienen una cobertura más allá de la división política del estado.

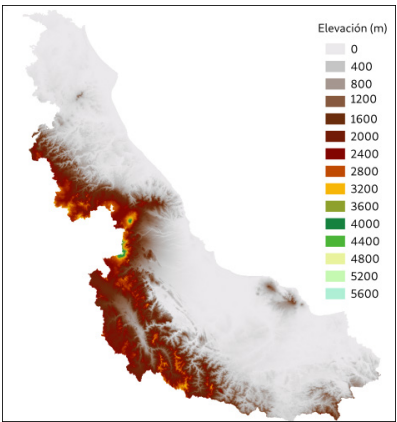
Figura 1. División política del estado de Veracruz y cuencas hidrológicas que cubren a la entidad



Fuente: elaboración propia.

El área y extensión total usadas para la comparación de los cambios del clima es una combinación entre la división política del estado de Veracruz y áreas de las cuencas hidrológicas, esta combinación se muestra en Figura 2, y es representada por un modelo digital de elevación (MDE).

Figura 2. Modelo digital de elevación que abarca en su totalidad al estado de Veracruz, en su mayoría a las cuencas que lo cubren



Fuente: elaboración propia.

Metodología

Para identificar la variación del clima en el estado de Veracruz, se utilizan dos bases de datos de la CONAGUA.

La primera base de datos es el CLICOM, un sistema de *software* para manejo de datos climatológicos desarrollado por las Naciones Unidas, que significa climate computing project. Estos datos climáticos fueron los de más fácil acceso y con una estructura estándar.

Con estos datos se generan los mapas de climatología, para los cuales se utiliza el período 1981-2010, pues los SMHN usan ese lapso de referencia de 30 años para evaluar los promedios a largo plazo y la variabilidad (OMM-2, 2019).

La segunda base de datos fue generada a lo largo del tiempo, teniendo como base los reportes diarios que el OCGC de la CONAGUA envía a la SPC-Ver, desde hace más de diez años y de los cuales se pudieron obtener continuamente datos del 2010 a la fecha.

Los datos climáticos para el estado han disminuido en la historia y actualmente se cuenta en Veracruz con unas 109 estaciones climatológicas funcionando, que miden parámetros básicos a las ocho de la mañana todos los días, unas 8 estaciones meteorológicas automáticas, y cinco observatorios meteorológicos, usualmente con equipo completo (Luna Díaz Peón, 2018).

Con la base de datos diarios se generan los mapas de clima promedio en los diez años más recientes para el periodo 2010-2019. Adicionalmente este periodo es de importancia ya que, según la OMM, la década de 2011 a 2020 será la más cálida de la que se tiene registro (OMM-3, 2020).

En ambos casos, las observaciones representan los datos recopilados durante las últimas 24 horas y reportados cada día a las 08:00 AM.

Para interpolar la temperatura se utiliza un modelo digital de elevación (MDE) mostrado en la Figura 2, el cual fue obtenido del INEGI.

Para este trabajo se utilizó programación en lenguaje python para la homogeneización de los datos y el procesamiento estadístico, mientras que para la interpolación y álgebra de mapas se usó el programa QGIS.

Para los mapas climatológicos 1981-2010, sólo se consideraron estaciones con un mínimo de 28 años de datos. Para los mapas de clima de diez años, se usaron datos de 2010-2019 y los disponibles del 2020; posteriormente, se identificaron estaciones que contaran con un mínimo de ocho años de datos.

En todos los casos, se utilizó la interpolación kriging, sin embargo, para el caso de las variables de temperatura, adicionalmente se consideró la variación de la altura, teniendo en cuenta que la temperatura disminuye con la altura a una razón de 6.5°C por cada kilómetro.

Para encontrar el valor que las estaciones hubieran registrado si estuvieran ubicadas en la misma elevación, se utilizó la siguiente ecuación:

$$T_{elev} = T_i + [G * (nb - elev)]$$

donde:

T_{elev} = Temperatura en función de la elevación

T_i = Temperatura registrada (máxima o mínima)

G = Gradiente térmico, donde -0.0065 es la razón a la que la temperatura disminuye con la altura cada metro

$elev$ = Elevación en la que se encuentra ubicada la estación

nb = Nivel base al que se homologarán las estaciones, para este caso el nivel del mar 0 metros

Calculada la temperatura que tendrían las estaciones a un mismo nivel, se interpola tomando como base la extensión y el tamaño de cada celda de malla del MDE mostrado en la Figura 2.

A partir de un raster con las mismas características espaciales que el modelo DEM, a cada celda de temperatura se da el valor en función de la elevación, para lo cual se utiliza la función:

$$T_{elev} = T_{grd} + [G * (MDE - nb)]$$

donde:

T_{elev} = Temperatura en función de la elevación

T_{grd} = Temperatura de la malla a un nivel base

G = Gradiente térmico, donde -0.0065 es la razón a la que la temperatura disminuye con la altura cada metro

MDE = Modelo digital de elevación

nb = Nivel base al que se homologarán las estaciones, para este caso el nivel del mar 0 metros

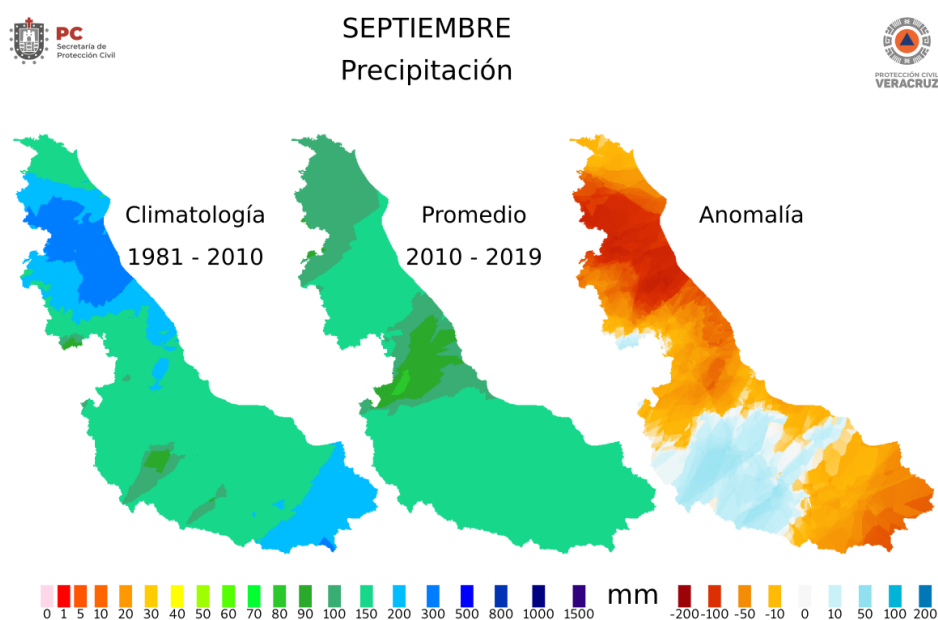
Resultados

Para cada variable se generaron mapas por mes: 1981-2010, 2010-2019 y su diferencia, con lo que se obtiene la anomalía de la variable, esto es 12 mapas climatológicos, 12 mapas de clima promedio y 12 mapas de anomalía, es decir 36 mapas por variable y en total 108 mapas para las tres variables analizadas en este trabajo.

Debido a la gran cantidad de mapas generados, en este trabajo únicamente se mostrarán los mapas de anomalía, excepto los ejemplos siguientes para una variable de un mes tomado aleatoriamente.

Iniciando con la precipitación, en la Figura 3 se presentan, de izquierda a derecha, la climatología de 30 años, el clima promedio en los últimos 10 años y su anomalía para el mes de septiembre, en la parte baja de los dos primeros mapas se muestra la barra de colores que comparten ambos; mientras que, para la anomalía, su barra de colores se muestra justo debajo del mapa de anomalía. Para todos los casos la unidad son milímetros, señalados con “mm” entre ambas barras de colores.

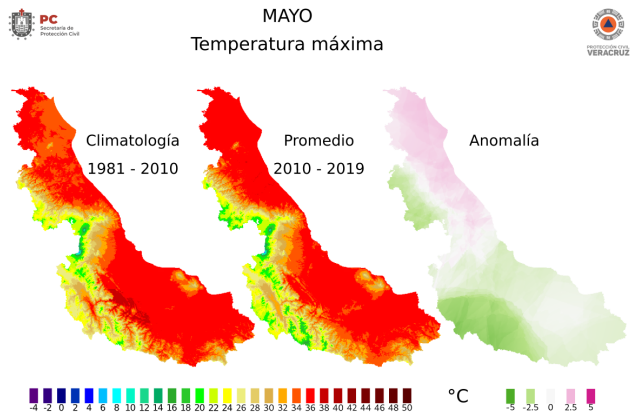
Figura 3. Mapas de precipitación para climatología, clima promedio y anomalía



Fuente: elaboración propia.

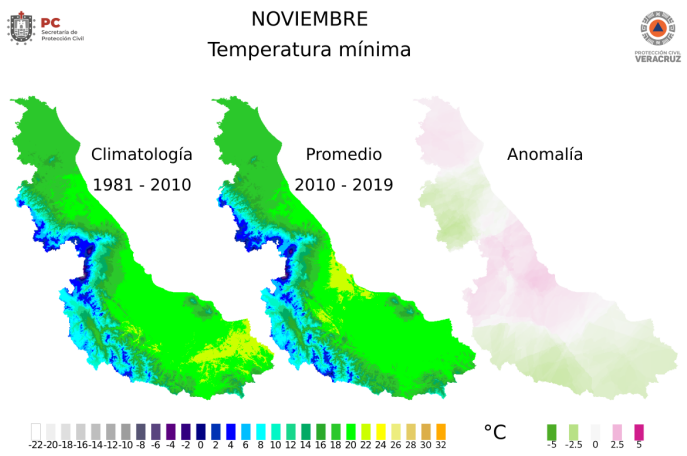
Los siguientes mapas a mostrar son los de temperatura máxima. En la Figura 4 se muestran —de izquierda a derecha— la climatología, clima promedio en los últimos 10 años y su anomalía para el mes de mayo. En la parte baja de los dos primeros mapas se muestra la barra de colores que comparten ambos; mientras que para la anomalía su barra de colores se muestra justo debajo del mapa de anomalía. Para todos los casos la unidad son grados Celsius, mostrado con “°C” entre ambas barras de colores.

Figura 4. Mapas de temperatura máxima para climatología, clima promedio y anomalía



Los últimos mapas de ejemplos son los de temperatura mínima. En la Figura 5 se muestran —de izquierda a derecha— la climatología, clima promedio en los últimos 10 años y su anomalía para el mes de noviembre. En la parte baja de los dos primeros mapas se muestra la barra colores que comparten ambos; mientras que, para la anomalía, su barra de colores se muestra justo abajo del mapa de anomalía. Para todos los casos la unidad son grados Celsius, mostrado con “°C” entre ambas barras de colores.

Figura 5. Mapas de temperatura mínima para climatología, clima promedio y anomalía



Los mapas de anomalías en el Apéndice A se clasifican por variable y por mes, las imágenes se muestran con las letras que identifican un mes. Por ejemplo, para enero, el mapa tiene asociada la E; para febrero, la F; y así sucesivamente hasta diciembre, con la D. En cada uno de los mapas también se identifica con un punto en color morado la ubicación de los 20 municipios considerados como prioritarios, los cuales se enlistan alfabéticamente a continuación:

Astacinga, Chumatlán, Coahuatlán, Filomeno Mata, Ilamatlán, Ixhuatlán de Madero, La Perla, Los Reyes, Magdalena, Mecatlán, Mecayapan, Mixtla de Altamirano, Santiago Sochiapan, Soledad Atzompa, Soteapan, Tatahuicapan de Juárez, Tehuipango, Texcatepec, Zontecomatlán de López y Fuentes, Zozocolco de Hidalgo.

Precipitación

Los mapas de anomalías desarrollados para este trabajo y mostrados en las figuras 7 y 9, para los meses de septiembre a abril de los últimos diez años, indican para la cuenca del Papaloapan un aumento de precipitación con respecto a la climatología y cuatro meses de menor precipitación —mayo, junio, julio y agosto—, para todo el estado.

De la cuenca del Pánuco a la del Tuxpan-Nautla se observa una disminución fuerte de julio a octubre (figuras 7 y 8). La cuenca del Pánuco muestra aumento de precipitación para los meses de marzo, octubre y noviembre (figuras 6 y 8) y disminución de precipitación el resto del año.

La cuenca del Coatzacoalcos muestra disminución de precipitación para todo el año.

Temperatura máxima

La parte norte de Veracruz muestra un apreciable aumento en temperatura para todo el año, de uno o más grados; especialmente la cuenca del Pánuco y, en menor grado, la cuenca del Tuxpan-Nautla. Excepción notoria es el mes de octubre en que disminuye la temperatura para todo el estado.

La cuenca del Papaloapan manifiesta disminución de temperatura todo el año, excepto en julio, agosto y septiembre.

En junio, julio, agosto y septiembre el aumento de temperatura es generalizado en casi todo el estado, excepto el extremo sur. La cuenca del Coatzacoalcos se mantiene más fresca que la media de 30 años durante todo el año.

La región de las montañas aparece como más caliente de mayo a septiembre y diciembre. El resto del año es más fresca.

Octubre sobresale como un mes menos caliente, para todo Veracruz, en comparación con la constante climatológica.

Temperatura mínima

Las zonas de montaña en la cuenca Tuxpan-Nautla muestran disminución de la temperatura todo el año.

En contraste, la zona de montaña de la cuenca del Papaloapan aparece con mayor temperatura todo el año, si se compara con la climatología de referencia.

La cuenca del Pánuco y Tuxpan-Nautla muestra disminución en mayo, junio, julio y agosto. El resto del año muestra un aumento de temperatura mínima.

La cuenca del Papaloapan presenta mayor temperatura todo el año.

Desde septiembre a abril, las cuencas del Pánuco, Tuxpan-Nautla y Papaloapan han aumentado su temperatura mínima, no así la cuenca del Coatzacoalcos que se mantiene todo el año a una temperatura inferior a la media climática.

Las cuencas del Pánuco y Tuxpan-Nautla son más frescas de mayo a agosto.

Conclusiones

En Veracruz, como en distintas partes de México, la agricultura es un medio de subsistencia y, para cualquier agricultor, conocer las condiciones climáticas le ayuda a comprender su región y los tipos de cultivo que se pueden sembrar a lo largo del año.

Además, conociendo la anomalía de la precipitación y temperatura, el agricultor puede hacerse una idea de cómo los cambios en el clima pueden afectar sus cultivos en el futuro.

Para que los mapas aquí presentados sean de apoyo para agricultores locales, se presentan también a nivel municipal.

Se observa que los cambios en precipitación y temperatura máxima y mínima son notorios en Veracruz, comparados con la constante climática del 1981 al 2010.

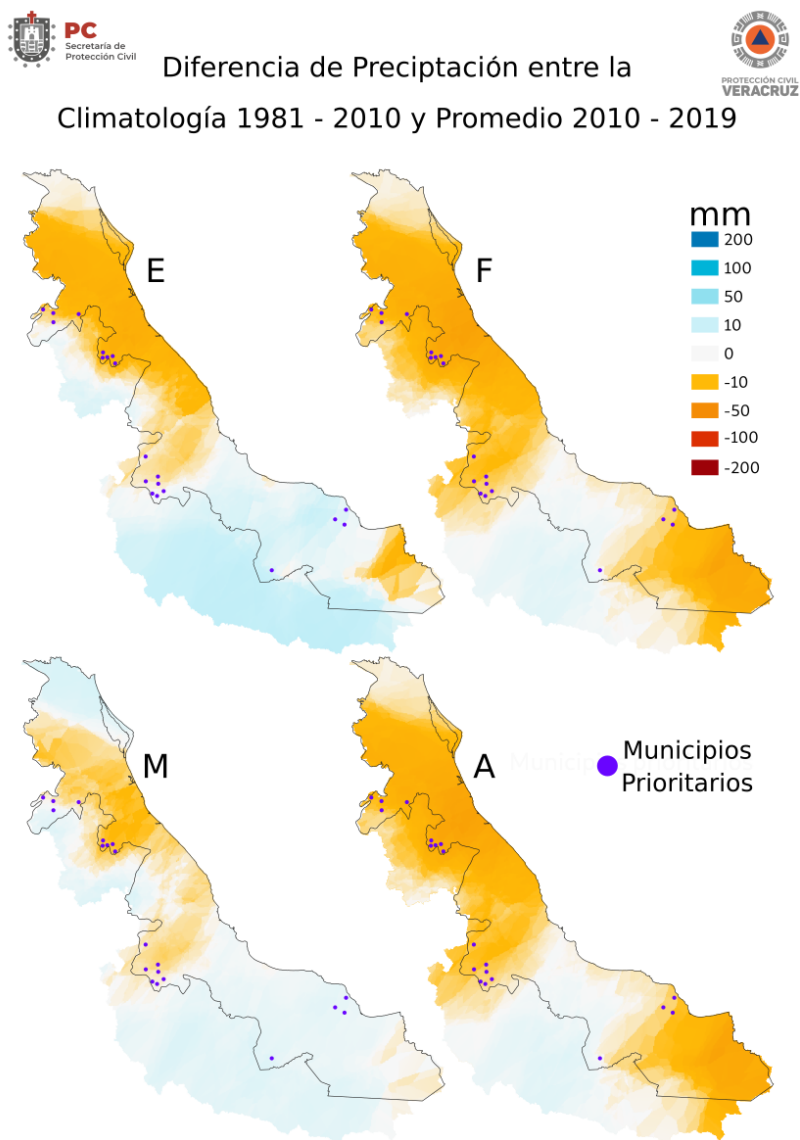
Esta aproximación cualitativa al cambio del clima de la última década refleja los cambios que los productores agropecuarios ya han experimentado en el rendimiento de sus actividades. La combinación de estos tres parámetros climáticos, en unión con muchas otras variables, son datos que los especialistas, como biólogos, agrónomos, veterinarios y otros, sintetizarán en consejos específicos a la población productiva y su confort en general.

Referencias bibliográficas

- Luna Díaz Peón, Antonio, Valdés Rodríguez, Ofelia & Villanueva-Solis, Jorge. (2018). Información climatológica de Veracruz, México (Climatological information from Veracruz, Mexico).
- SIAP (2018). Aptitud agroclimática de México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/394467/09_Aptitud_agroclim_tica_de_M_xico_de_septiembre__2018.pdf (última revisión del documento en el sitio web: 03/12/2020)
- INIFAP (2012). Potencial productivo de especies agrícolas de importancia socioeconómica en México. <https://www.cmdrs.gob.mx/sites/default/files/cmdrs/sesion/2018/09/17/1474/materiales/inifap-estudio.pdf> (última revisión del documento en el sitio web: 03/12/2020)
- SAGARPA, FAO (2012). Agricultura familiar con potencial productivo en México. <http://www.fao.org/3/a-bc944s.pdf> (última revisión del documento en el sitio web: 03/12/2020)
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). Base de datos de requerimientos agroecológicos para el desarrollo de cultivos. <http://ecocrop.fao.org/ecocrop/srv/en/home> (última revisión del sitio web: 03/12/2020)
- OMM-1 (2016), <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-organizacion-meteorologica-mundial-confirma-que-2015-es-el-año-más> (última revisión del sitio web: 03/12/2020).
- OMM-2. (2019). <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/la-omm-confirma-que-los-últimos-cuatro-años-han-sido-los-más> (última revisión del sitio web: 03/12/2020)
- OMM-3. (2020), <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-2020-está-en-camino-de-ser-uno-de-los-tres-años-más> (última revisión del sitio web: 03/12/2020).

Apéndice A

Figura 6. Mapas de anomalía de precipitación. E: enero, F: febrero, M: marzo, A: abril.

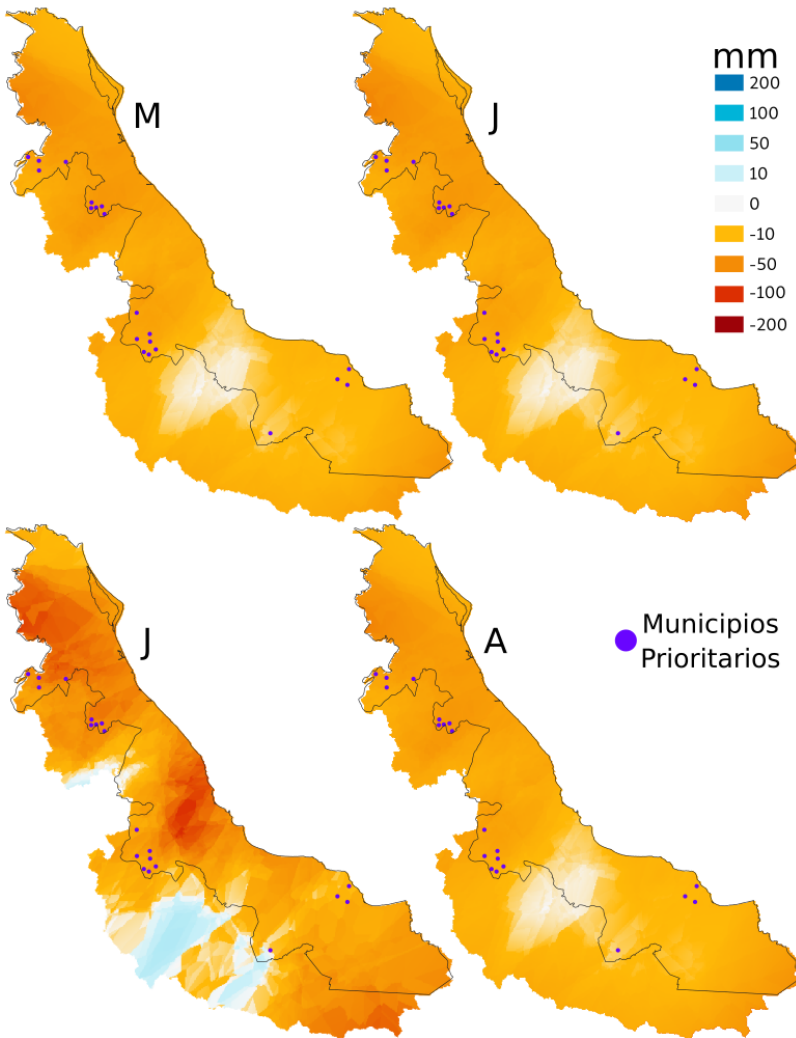


Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Mapas de anomalía de precipitación, M: mayo, J: junio (esq. sup, der),
J: julio (esq. inf, izq), A: agosto



Diferencia de Precipitación entre la
Climatología 1981 - 2010 y Promedio 2010 - 2019

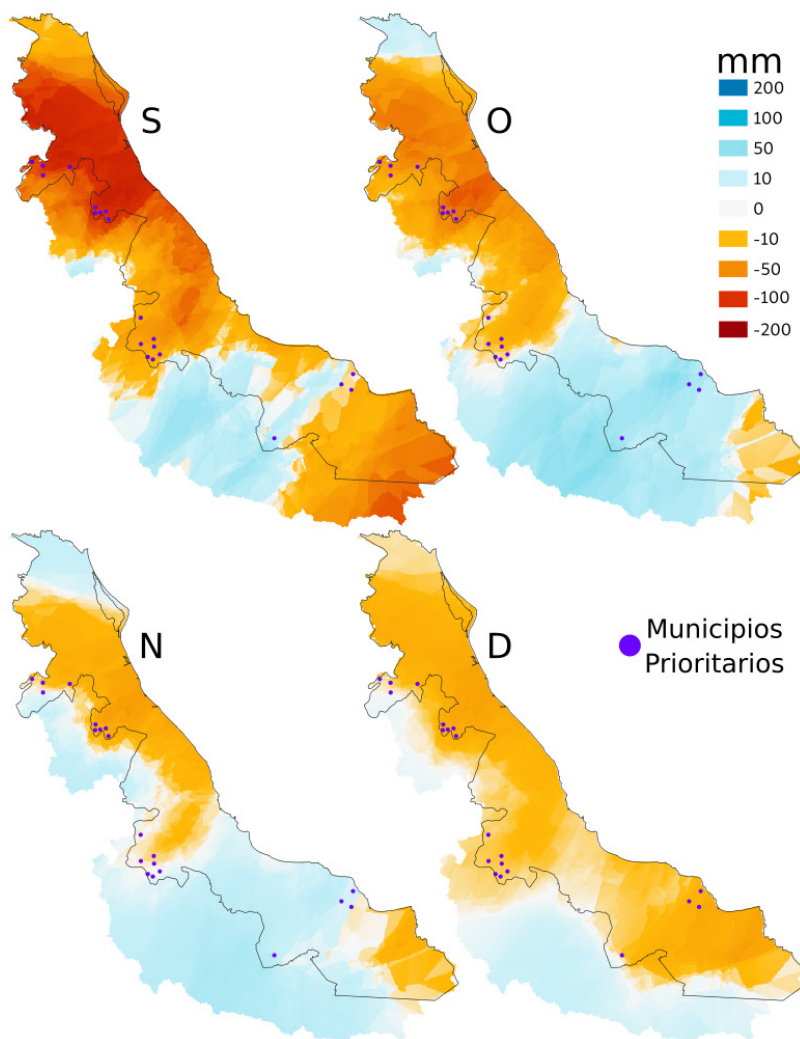


Fuente: elaboración propia.

Figura 8. Mapas de anomalía de precipitación, S: septiembre, O: octubre, N: noviembre, D: diciembre



Diferencia de Precipitación entre la Climatología 1981 - 2010 y Promedio 2010 - 2019

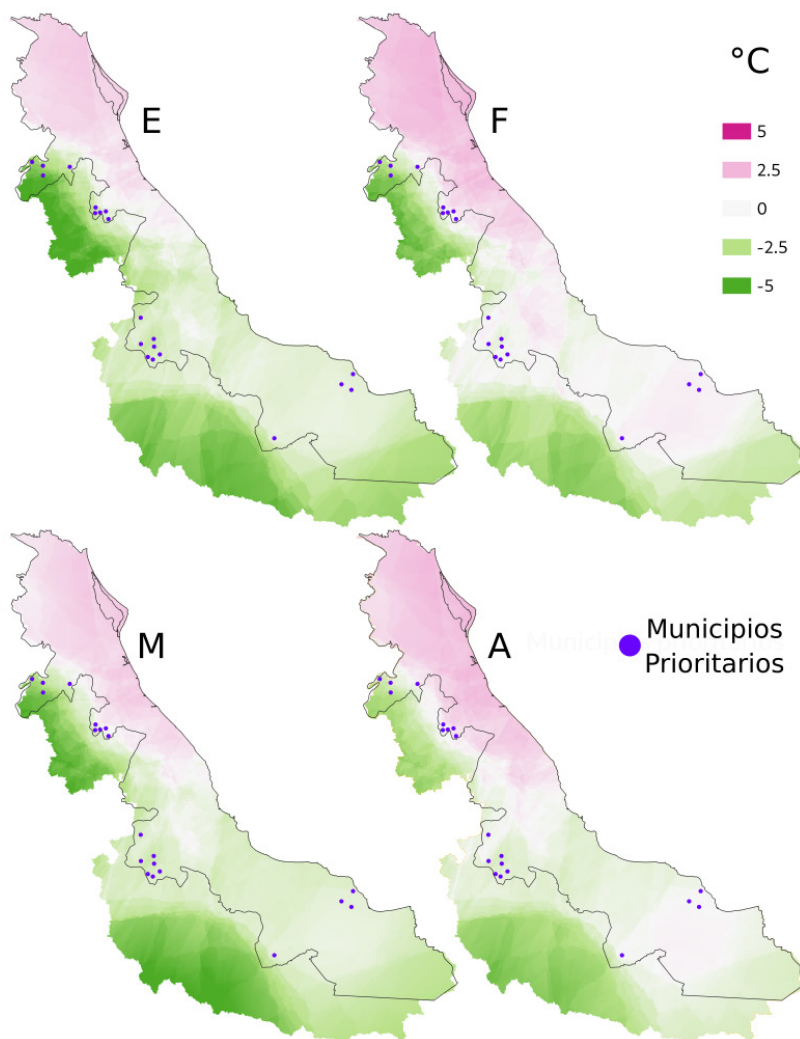


Fuente: elaboración propia.

Figura 9. Mapas de anomalía de temperatura máxima, E: enero, F: febrero, M: marzo, A: abril



Diferencia de Temp. máxima entre la
Climatología 1981 - 2010 y Promedio 2010 - 2019

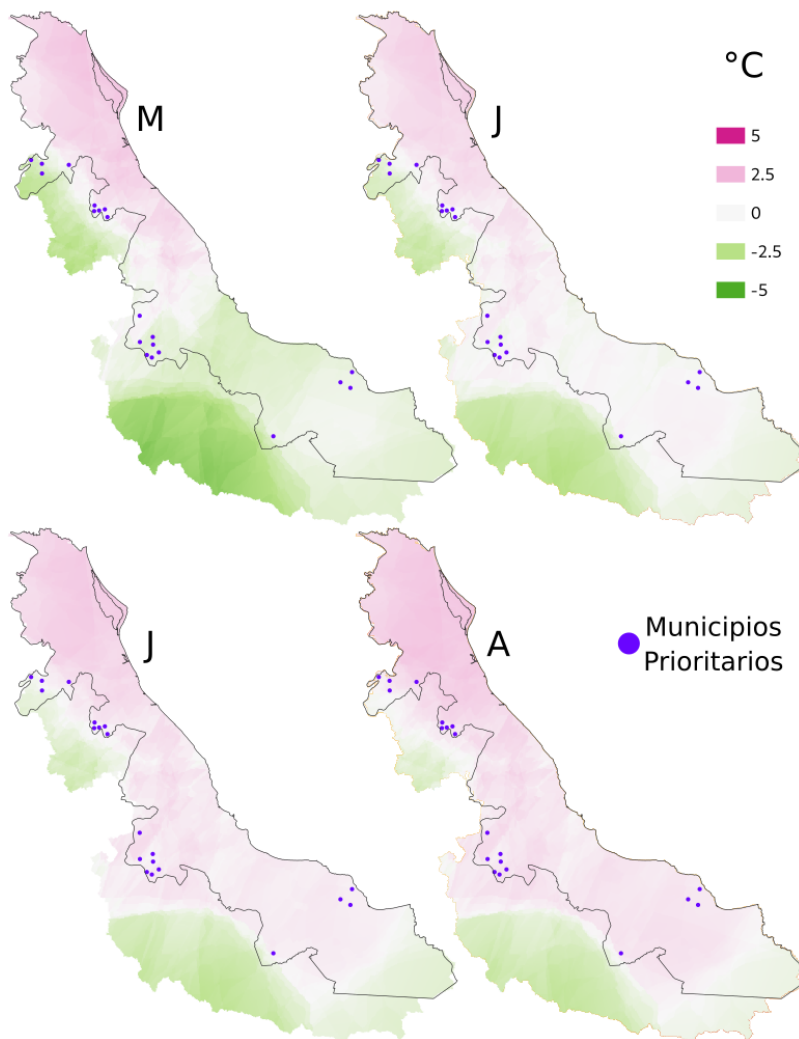


Fuente: elaboración propia.

Figura 10. Mapas de anomalía de temperatura máxima, M: mayo, J: junio (esq. sup, der), J: Julio (esq. inf, izq), A: agosto



Diferencia de Temp. máxima entre la Climatología 1981 - 2010 y Promedio 2010 - 2019

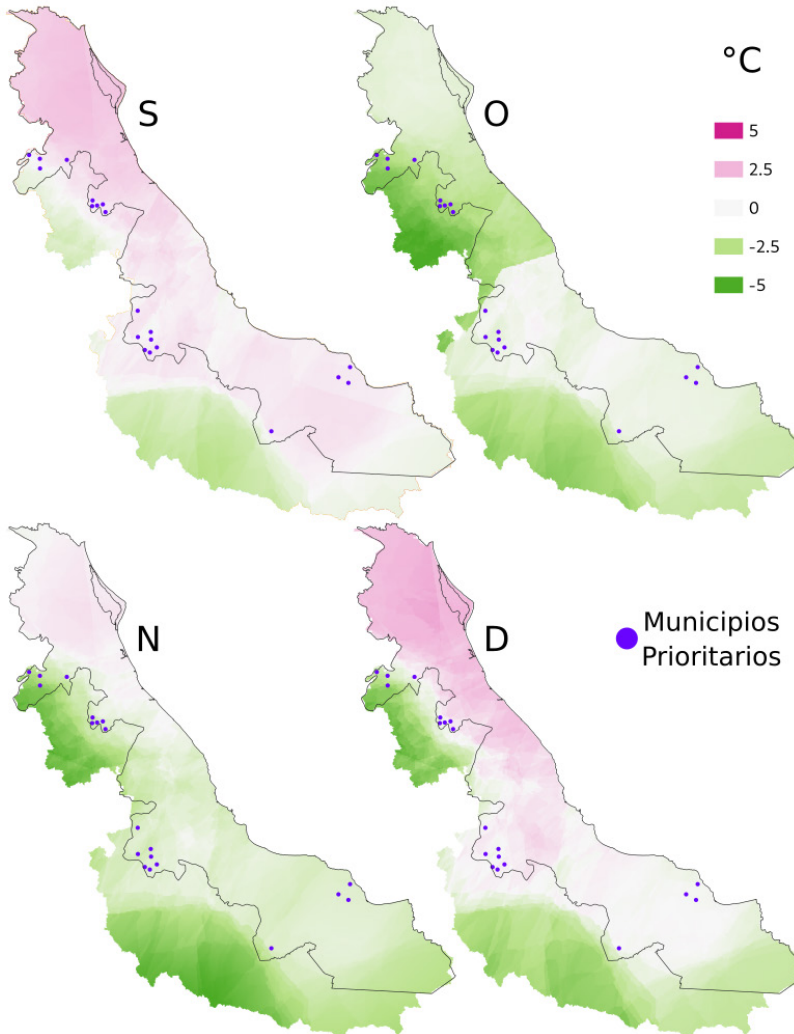


Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Mapas de anomalía de temperatura máxima, S: septiembre, O: octubre, N: noviembre, D: diciembre

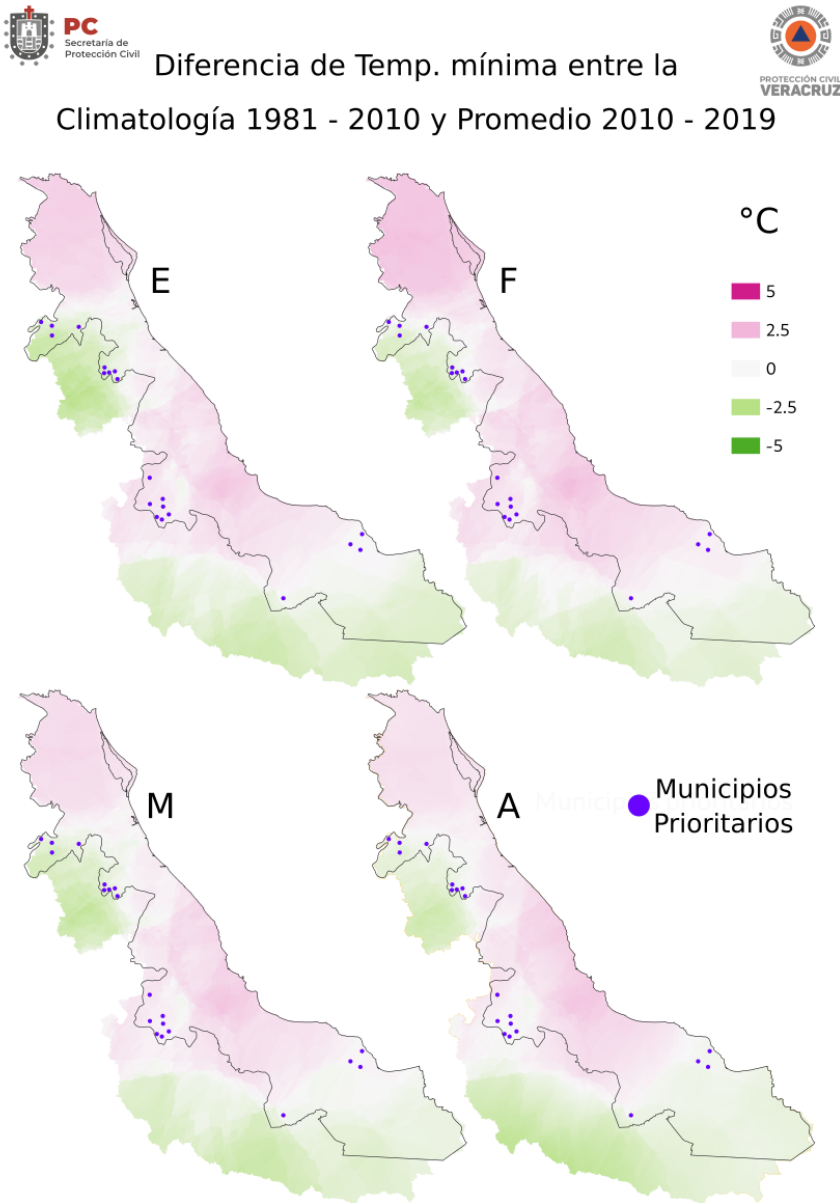


Diferencia de Temp. máxima entre la
Climatología 1981 - 2010 y Promedio 2010 - 2019



Fuente: elaboración propia.

Figura 12. Mapas de anomalía de temperatura mínima, E: enero, F: febrero, M: marzo, A: abril

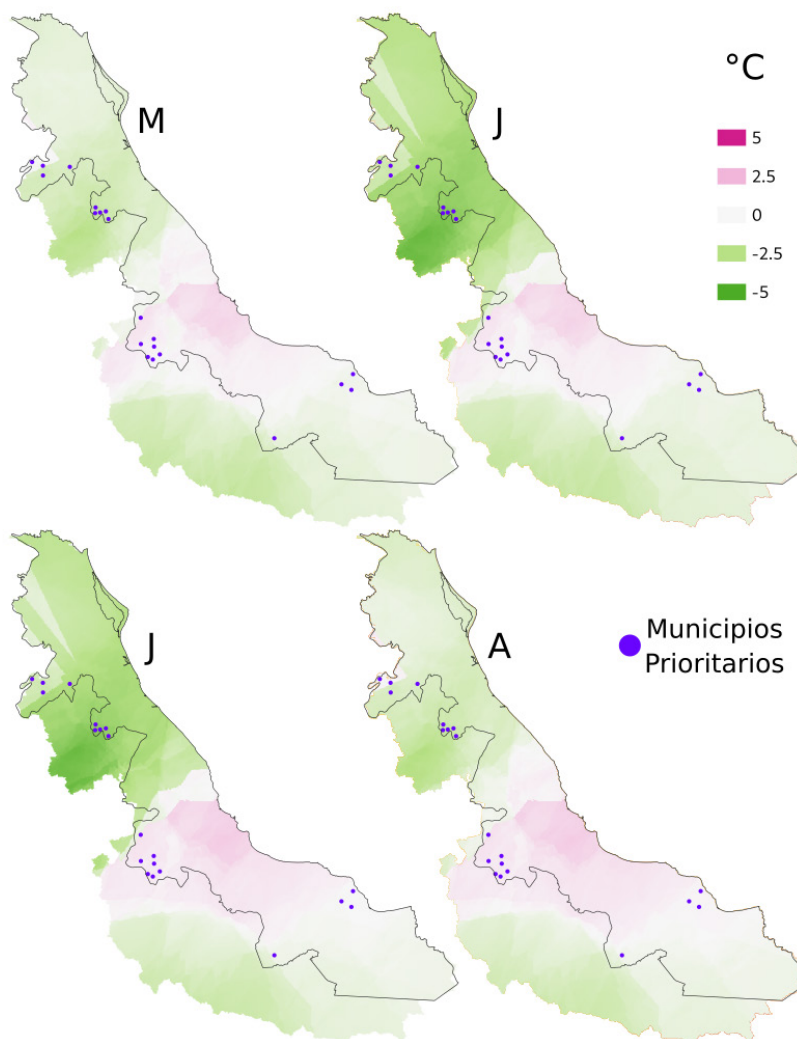


Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Mapas de anomalía de temperatura mínima, M: mayo, J: junio (esq. sup, der), J: julio (esq. inf, izq), A: agosto



Diferencia de Temp. mínima entre la
Climatología 1981 - 2010 y Promedio 2010 - 2019

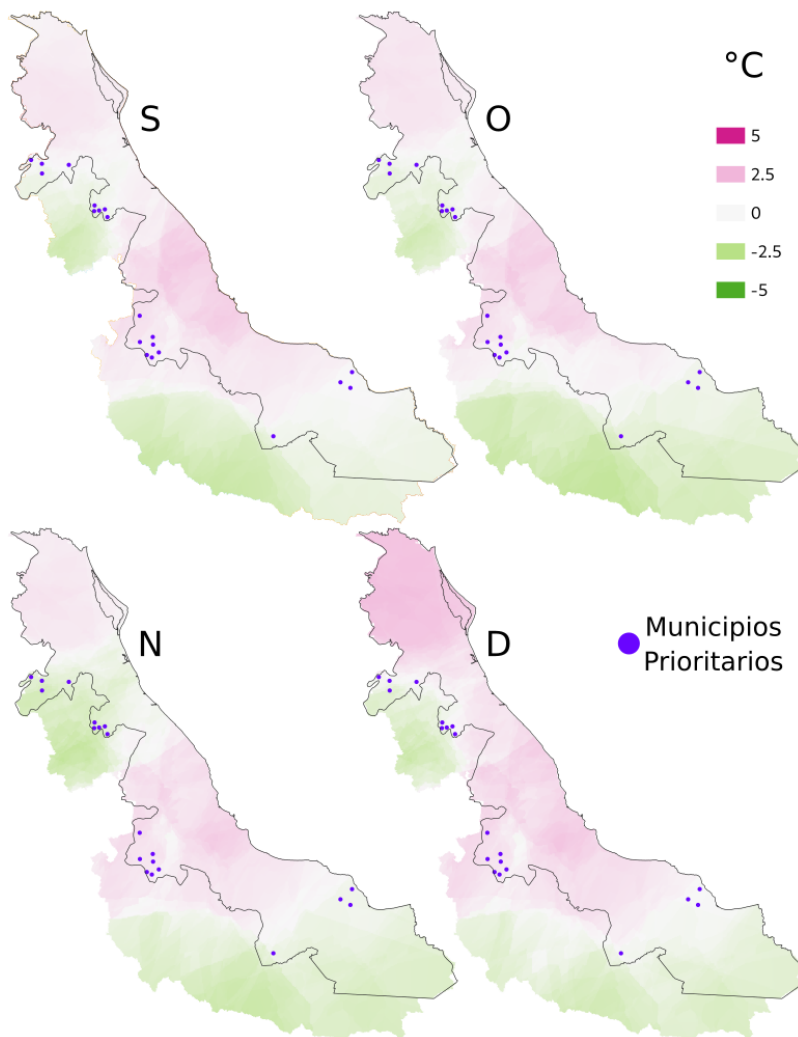


Fuente: elaboración propia.

Figura 14. Mapas de anomalía de temperatura mínima, S: septiembre, O: octubre, N: noviembre, D: diciembre



Diferencia de Temp. mínima entre la
Climatología 1981 - 2010 y Promedio 2010 - 2019



Fuente: elaboración propia.

Capítulo V

Potencial de desastres por inundación en la zona limítrofe entre Quintana Roo y Campeche, México

*Gerardo Daniel López Montejo*¹, *Oscar Frausto Martínez*²,
*Ma. Luisa Hernández Aguilar*³

¹ Maestro en Planeación Ambiental. Responsable del Centro de Información Geográfica, adscrito a la División de Ciencias e Ingeniería de la Universidad de Quintana Roo. Campus Chetumal. Dirección electrónica: lmontejo@uqroo.edu.mx

² Dr. Ing. Geógrafo. Profesor investigador de la División de Desarrollo Sustentable de la Universidad de Quintana Roo. Campus Cozumel.

³ Doctora en Geografía. Profesora de Apoyo Técnico Académico del Área de Sistemas de Información Geográfica y Percepción Remota. Centro de Información Geográfica. Universidad de Quintana Roo. Campus Chetumal.

Resumen

Las inundaciones son un fenómeno hidrometeorológico que se produce por eventos extremos de precipitación y que afecta un área limitada, donde generalmente existen zonas con deficiente drenaje o sujetas a inundación ordinaria o extraordinaria. Son las amenazas naturales de mayor frecuencia y con mayor repercusión socioeconómica a nivel mundial, por lo que son un reto en la gestión y reducción del riesgo de desastres. En Quintana Roo, las principales elevaciones del terreno se encuentran en su límite con el estado de Campeche, esta zona es conocida de manera popular como “zona limítrofe”. Cuando se presentan precipitaciones extremas en la zona limítrofe, ya sea por ciclones tropicales o lluvias atípicas, las localidades y los productores agropecuarios sufren grandes pérdidas económicas por las inundaciones que se presentan en la parte baja de las cuencas localizadas en su interior, las cuales se ven continuamente afectadas por los escurrimientos de agua y el aumento en el nivel del Río Hondo. Este trabajo utiliza la metodología desarrollada por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) para la evaluación de inundaciones, en conjunto con un análisis morfométrico del relieve. A partir de lo anterior, se determinaron las áreas susceptibles de inundación. Se distinguen dos zonas de peligro por inundación pluvial y aumento del nivel freático, una de ellas al sur, sobre

la carretera federal Escárcega-Chetumal y cercana a la localidad de Nicolás Bravo. La otra se ubica en las localidades de Reforma, Huatusco y Río Escondido, en el municipio de Bacalar. Los resultados alcanzados pueden contribuir a la planeación de acciones, obras de mitigación, desarrollo urbano y reducción del riesgo de desastres.

Introducción

Las inundaciones son los fenómenos naturales de mayor frecuencia e impacto en América Latina y el Caribe (OCHA, 2020) por lo que son un reto en la gestión y reducción del riesgo de desastres. Se originan por la combinación de diversos factores naturales, de infraestructura y sociales. Los factores naturales son las condiciones climáticas, como la precipitación excesiva (inundaciones pluviales), o el deshielo de las montañas, o por ciclones tropicales o tsunamis (inundaciones costeras). Un segundo factor se relaciona con la combinación del desbordamiento de los lagos, río o arroyos (inundaciones pluviales) que inundan terrenos adyacentes por los procesos de urbanización inadecuados, cambios de uso de suelos y faltas a las normativas de los códigos de construcción (Alcocer-Yamanaka *et al.*, 2016). Otra causa se vincula al desbordamiento de presas o diques de contención, ya que sus construcciones muchas veces modifican caudales de río para abastecer necesidades humanas.

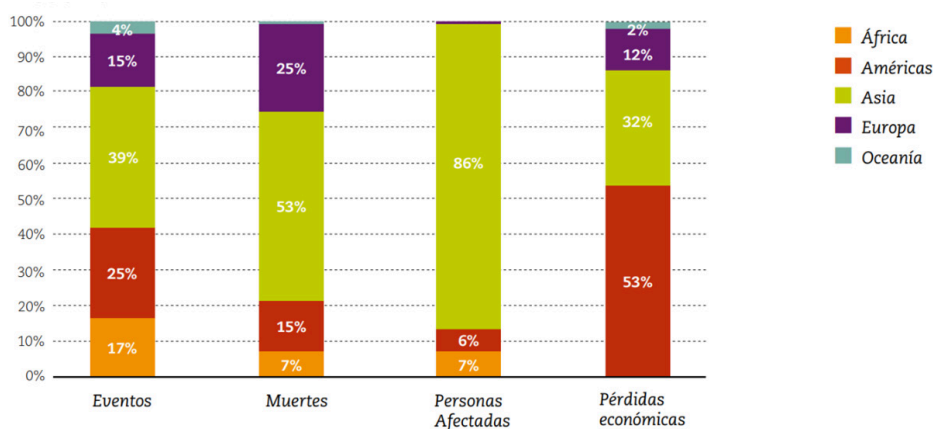
De acuerdo con la UNDRR (2018), una inundación pluvial es cuando el agua se acumula después de fuertes lluvias debido al bloqueo o falta de capacidad de desagüe y afecta un área limitada. El agua acumulada puede permanecer estancada por horas o días, lo que trae consigo una serie de problemas adicionales (enfermedades gastrointestinales y/o provocadas por vectores) a las afectaciones que se pueden tener por la presencia de agua estancada.

El Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) espera que el aumento en la temperatura ocasionado por el cambio climático modifique significativamente los patrones tradicionales de precipitación a nivel mundial, afectando actividades que están ligadas a los recursos hídricos, tales como la producción alimentaria, el suministro de agua potable y el saneamiento (IPCC, 2014). Otro factor importante que aumenta los niveles de riesgo por inundaciones es el crecimiento urbano que modifica los ecosistemas locales. La mayoría de las veces los espacios urbanos y rurales se encuentra en una condición de vulnerabilidad debido solamente a su ubicación, posición o localización (Woitrin-Bibot *et al.*, 2015).

El IPCC (2014) señala, también, que entre 1998 y 2017 el número de personas afectadas por las inundaciones fue de 2,000 millones, lo que representa el 45% del total de personas afectadas por algún desastre a nivel mundial. Como puede

verse en la Figura 1, el continente con la mayor cantidad de pérdidas económicas es América (UNDRR, 2018).

Figura 1. Costos humanos y económicos relativos ocasionados por desastres climáticos por continente durante el periodo 1998 – 2017



Fuente: *Pérdidas económicas, pobreza y desastres, 1998-2017*, UNDRR, (2018).

En América, uno de los países más afectados es México, donde las inundaciones que ocurren año con año ocasionan serios problemas, principalmente en la zona sur y sureste del país, debido a la presencia de lluvias intensas. Ocasionadas por su localización geográfica dentro de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), además de encontrarse dentro de la trayectoria de los ciclones tropicales que se desarrollan en el Océano Atlántico.

La región sureste del país presenta más y más incrementos en la intensidad y el número de eventos hidrometeorológicos extremos, precipitaciones, tormentas tropicales, huracanes; lo que ha provocado graves afectaciones a las comunidades ubicadas en ese territorio, así como pérdidas a la producción agropecuaria. El último fenómeno presentado y contabilizado se dio a mediados de junio de 2018 al sur de Quintana Roo, registrando pérdidas por 1,245.5 millones de pesos por la presencia de lluvias intensas (CENAPRED, 2019), siendo el cuarto lugar nacional en pérdidas económicas para ese año, entre éstas infraestructura carretera y viviendas.

En este trabajo se utiliza la metodología desarrollada por Salas (2014) para la elaboración de mapas de riesgos por inundación en zonas urbanas en el análisis del potencial de inundaciones en la zona limítrofe entre los estados de Campeche y Quintana Roo, México. La parte oeste de la zona limítrofe es colectora de

flujos hidrológicos superficiales debido a su topografía; mientras que, al este, las planicies bajas acumulativas se convierten en receptáculos de los flujos de agua, lo que favorece la inundabilidad, tal como ocurre cuando se presentan lluvias importantes (Palacio Aponte & Frausto Martínez, 2018). Históricamente se han registrados varias inundaciones, la más reciente fue en junio de 2020, afectando a 6,669 familias y dañando 330 kilómetros de carretera, de acuerdo con el Gobierno del Estado de Quintana Roo.

Área de estudio

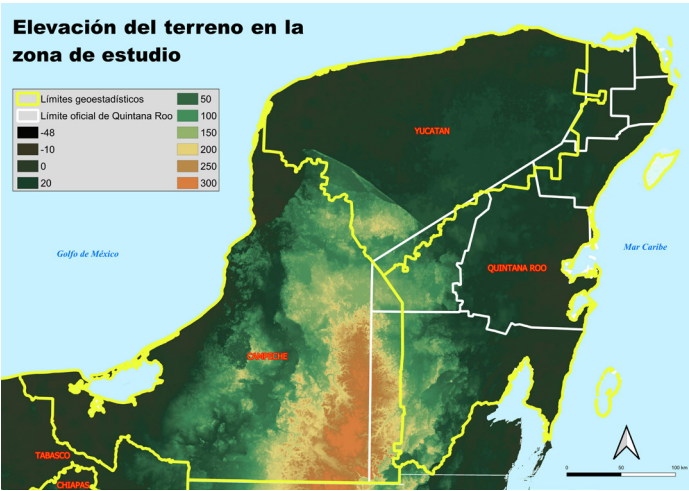
Al sureste de la República mexicana se localiza la región de la península de Yucatán, integrada por tres estados: Yucatán, Campeche y Quintana Roo, por lo que comparten fronteras administrativas. La frontera entre estos dos últimos estados es conocida de manera popular como “zona limítrofe”; y es ahí donde se ubican las principales elevaciones de esta planicie (figura 2). Ambos estados son “estados frontera”, Campeche con los países de Guatemala y Belice; y Quintana Roo solo con Belice, separados por un elemento geográfico, el Río Hondo, que tiene su desembocadura en la Bahía de Chetumal. Cuando se presentan precipitaciones extremas en la zona limítrofe, ya sea por ciclones tropicales o lluvias atípicas, las localidades y los productores agropecuarios sufren grandes pérdidas económicas por las inundaciones que se presentan en la parte baja de las cuencas localizadas en su interior, las cuales se ven continuamente afectadas por los escurrimientos de agua y el aumento en el nivel del Río Hondo.

La precipitación en la península de Yucatán está regida por patrones de circulación atmosférica propios de las zonas tropicales en el límite con las zonas áridas. La singularidad que tiene la región es la ausencia de una orografía muy cambiante, lo cual no permite que se presente el efecto del ascenso orográfico de las nubes que descargan lluvia, como en otras regiones del país, el componente principal es el de lluvia convectiva (Orellana, *et al.*, 2003).

Contexto físico y geográfico

Las mayores elevaciones del terreno de la península de Yucatán (figura 2) se encuentran al sur, entre los límites de los estados de Quintana Roo y Campeche, encontrándose altitudes alrededor de los 300 metros sobre el nivel del mar; al oeste en los límites con Yucatán se tienen alturas hasta de 100 metros sobre el nivel del mar y al norte la altitud alcanza 50 metros, que van disminuyendo hasta llegar a cero conforme se aproxima la costa. En la Figura 2, se pueden observar estas altitudes señaladas justo en el área limítrofe entre estos dos estados.

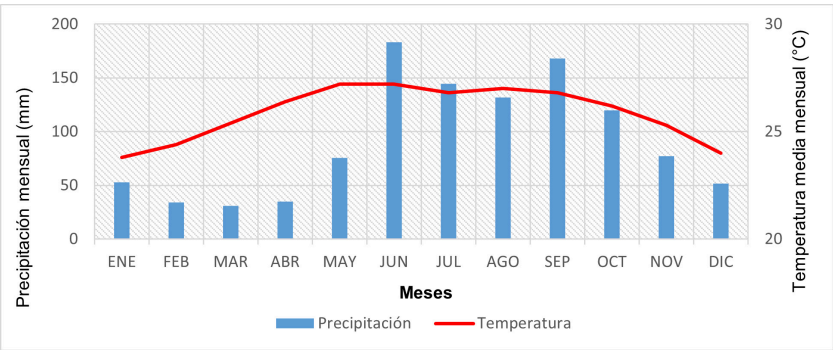
Figura 2. Mapa de elevaciones del terreno (en metros) para la Península de Yucatán



Fuente: Modelo Digital de Elevaciones del INEGI (2006).

El área de estudio tiene un clima cálido subhúmedo con lluvias de verano, con una temperatura media de 25.9 °C (tabla 1) y un régimen pluvial con dos periodos claramente diferenciados (figuras 3 y 4), un periodo de lluvias durante los meses de junio a noviembre (con una precipitación media mensual de 137.4 mm) y una época de secas en los meses de diciembre a mayo (con una precipitación media mensual de 46.65 mm).

Figura 3. Climograma de la estación meteorológica 23016 Nicolás Bravo, en el área de estudio



Fuente: Normales climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2010).

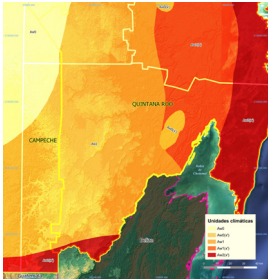
Sin embargo, como una consecuencia del cambio climático, los periodos de precipitación severa y sequía se han extendido. Esto ha derivado en grandes inundaciones, como las registradas en la península de Yucatán a consecuencia de las tormentas tropicales “Amanda” y “Cristóbal” en 2020, lo que demuestra cómo el cambio climático pone en riesgo la integridad ambiental de la zona y del país en su conjunto. Representan además el ejemplo de cómo el cambio climático derivado del incremento en la temperatura del planeta está afectando seriamente el delicado equilibrio ecológico de la península (Iglesias, 2011).

Tabla 1. Descripción de las unidades climáticas

Clave	Descripción
Aw0	Cálido subhúmedo con lluvias de verano, y sequía en invierno, % de lluvia invernal entre 5 y 10.2, con un cociente P/T menor de 43.2
Aw0(x')	Cálido subhúmedo con lluvias de verano, y sequía en invierno, % de lluvia invernal mayor de 10.2, con un cociente P/T menor de 43.2
Aw1	Cálido subhúmedo con lluvias de verano, y sequía en invierno, % de lluvia invernal entre 5 y 10.2, con un cociente P/T entre 43.2 y 55.3
Aw1(x')	Cálido subhúmedo con lluvias de verano, y sequía en invierno, % de lluvia invernal mayor de 10.2, con un cociente P/T entre 43.2 y 55.3
Aw2(x')	Cálido subhúmedo con lluvias de verano, y sequía en invierno, % de lluvia invernal mayor de 10.2, con un cociente P/T mayor a 55.3

Si bien existen algunas diferencias entre las unidades climatológicas de la península de Yucatán en su conjunto, y especialmente de la zona de estudio (tabla 1 y figura 5), el aumento de las temperaturas en la región ha tenido efectos perceptibles dentro del ciclo hidrológico.

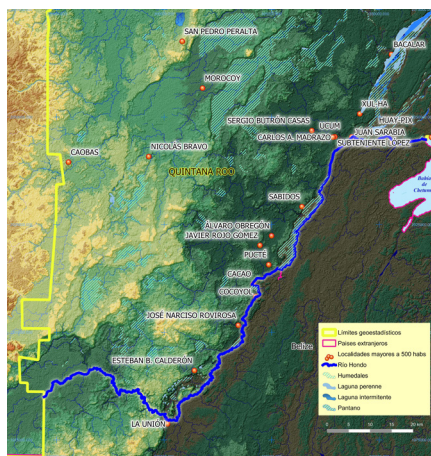
Figura 4. Mapa de climático para la Península de Yucatán



Fuente: Unidades climatológicas del INEGI (2000).

En cuestión hidrológica, el elemento geográfico con más relevancia al sur del área de estudio es el Río Hondo (figura 5), que marca la frontera con el país de Belice; desemboca en el interior de la Bahía de Chetumal con un flujo aproximado de 70-80 m³/s. Este río se ha desbordado en varias ocasiones, causando inundaciones pluviales. La más grave ocurrió en 2008 y obligó a los habitantes de las comunidades de La Unión, Revolución, Pioneros del Río, Tambores de Emiliano Zapata y Nueva Revolución a evacuar sus viviendas. Dicha ocupación de las zonas cercanas a los ríos es uno de los principales factores que acrecienta el riesgo de inundaciones (Salas y Jiménez, 2019). En muchos casos las comunidades no conocen los sitios por donde escurre el agua en forma natural. El diseño y ejecución de política pública deberá, por tanto, recaer en gran medida sobre la base de la evaluación y planificación sustentable de las ciudades, de sus espacios rurales y de conservación (Oswald, 2010).

Figura 5. Mapa de localidades y cuerpos de agua en el área de estudio



Fuente: Modelo Digital de Elevaciones del INEGI (2006).

Materiales y métodos

La precipitación que se produce en una región, país o ciudad no es constante, y el escurrimiento que se genera se deriva de la extensión de la zona y de sus características (tamaño, pendiente, tipo de suelo, cobertura vegetal, etc.). Su cálculo depende de cada sitio donde se tome el dato. Es por eso que la precipitación se caracteriza como una altura o lámina (mm); de esta manera es posible comparar la altura de la lluvia en diferentes puntos de una cuenca, o bien, obtener un promedio (Salas y Jiménez, 2019). Actualmente, las inundaciones se estiman usando dos va-

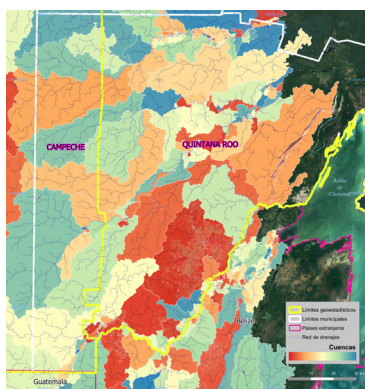
riables, la primera es la altura de la lámina de agua formada (en mm) y la segunda es la intensidad de la precipitación que relaciona esta altura de la lámina de agua con el tiempo que tardó la lluvia en alcanzarla (mm/hrs). El Servicio Meteorológico Nacional clasifica las lluvias de fuertes a intensas a aquellas que son mayores a 50 mm en un periodo de 24 horas.

Para este trabajo la delimitación de áreas con potencial a inundarse se realizó con la metodología establecida por Salas (2014). Los insumos principales fueron el Modelo Digital de Elevaciones (MDE) provisto por el INEGI (2006) en su Continuo de Elevaciones Mexicano 3.0, con resolución espacial de 15 m (figura 4); y el mapa de periodos de retorno para 100 años, generado por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (figura 7).

A partir del MDE se identificaron los “parteaguas” o “divisorias de aguas” de las cuencas en el área de estudio, utilizando *software* especializado en análisis espacial. Cada una de estas cuencas tiene como límite líneas imaginarias (parteaguas) formadas por los puntos de mayor nivel topográfico y que la separan de las cuencas vecinas. Una cuenca es una zona del terreno donde (si fuera impermeable) las gotas de lluvia que caen sobre ella tienden a ser drenadas por su red de drenaje hacia un mismo punto de salida (IMTA, 2019). A partir del MDE se derivaron las direcciones de flujo y las zonas de acumulación, obteniendo la red de drenaje del área de estudio.

En la Figura 6 se puede observar la red de drenaje y las cuencas derivadas del MDE de la zona. De la misma manera, en color rojo, se distinguen las cuencas con mayor longitud en su red de drenaje, y en lo que corresponde al área de estudio se encuentran las cuencas más grandes. Se puede decir que a mayor área mayor caudal medio.

Figura 6. Mapa de cuencas y red de drenaje en el área de estudio



Fuente: Modelo Digital de Elevaciones del INEGI (2008).

Utilizando la fórmula de Taylor–Schwartz se calculó la pendiente media de cada una de las cuencas.

$$S_{media} = \left[\frac{L}{1 + \frac{l_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{l_2}{\sqrt{S_2}} + \dots + \frac{l_m}{\sqrt{S_m}}} \right]^2$$

Donde:

S_{media} : pendiente media de la corriente de mayor orden.

L : es la longitud horizontal del cauce principal, desde su nacimiento como corriente de orden uno hasta la salida de las cuencas.

l_m : es la longitud horizontal de los tramos en los cuales se subdivide el cauce principal.

S_m : es la pendiente de cada segmento, en que se divide el cauce principal.

Utilizando la fórmula de *Kirpich* se calculó el tiempo de concentración de la cuenca. Este valor nos dice en cuántos minutos la cuenca estaría aportando agua al punto de salida de esta. Es decir, en cuánto tiempo la cuenca estaría llena y desbordando.

$$t_c = 0.000325 \frac{L^{0.77}}{S^{0.385}}$$

Donde L es la longitud del segmento de red y S la pendiente del mismo segmento.

Para estimar la capacidad de la cuenca se utilizaron los mapas de precipitación máxima con intensidad de una hora y 24 horas y periodo de retorno de 100 años (figura 7), generados por la SCT (2015) y la siguiente fórmula:

$$hp_{tc} = \frac{hp_{24} - hp_1}{3.1781} (\ln(t_c)) + hp_1$$

Donde:

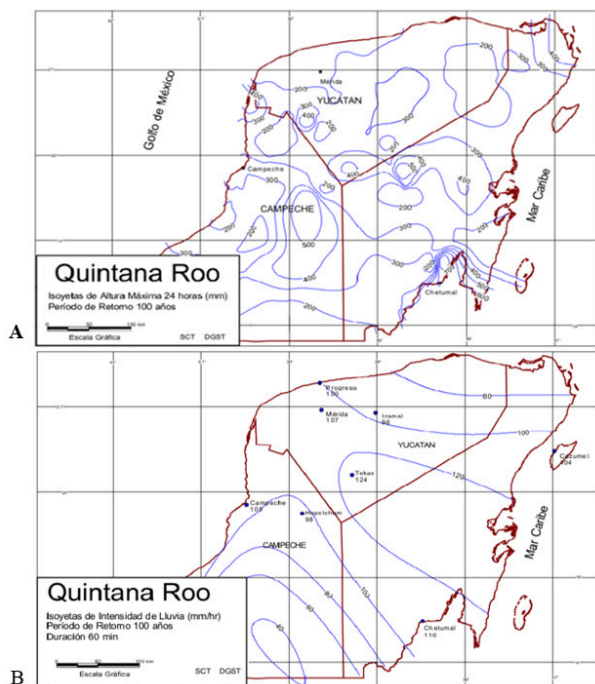
hp_{tc} : valor de la precipitación para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca en estudio, mm.

hp_{24} : valor de la precipitación para una duración de 24 horas y un determinado periodo de retorno, mm.

hp_1 : valor de la precipitación para una duración de 1 hora y un determinado periodo de retorno, mm.

t_c : tiempo de concentración de la cuenca en estudio.

Figura 7. Isoyetas de precipitación máxima en 1 y 24 horas para un periodo de retorno de 100 años



Fuente: Secretaría de Comunicaciones y Transporte (SCT, 2015).

El gasto de diseño se calculó utilizando la fórmula racional, que es una de las más utilizadas actualmente. Este método considera que el gasto máximo se alcanza cuando la precipitación se mantiene con una intensidad constante durante un tiempo igual al tiempo de concentración.

$$Q_P = 0.278 C i A$$

Donde:

C: Coeficiente de escurrimiento, representa la fracción de la lluvia que escurre en forma directa. Varía entre 0 y 1. En este caso se utilizó el valor de 0.77 que es el adecuado para los usos de suelo de tipo natural.

i: intensidad media de la lluvia para una duración igual al tiempo de concentración de la cuenca, mm/h.

A: Área de la cuenca en kilómetros cuadrados.

Tabla 2. Características morfométricas e hidrológicas de las cuencas

Cuenca	Pendiente	tc (horas)	tc (minutos)	Longitud (km)	Área cuenca (km ²)	Pr_100 (mm)				
						24 Horas	1 Hora	hp (mm)	i (mm/h)	Qp (m ³ /s)
1	3.290	4.84	290.23	432.404	877.034	200	100	149.60	30.93	2,262.18
2	5.047	0.52	31.43	29.864	55.929	200	80	55.59	106.11	494.95
3	3.620	1.69	101.68	116.177	298.568	200	80	99.92	58.96	1,468.10
4	2.429	5.30	317.84	418.164	824.694	200	100	152.46	28.78	1,979.49
5	2.938	3.48	208.53	266.001	921.634	200	100	139.20	40.05	3,078.54
6	3.040	1.83	109.71	117.508	370.548	200	80	102.79	56.21	1,737.17
7	2.809	4.26	255.78	339.092	556.415	200	100	145.62	34.16	1,585.18
8	3.385	2.03	121.64	141.776	741.327	200	80	106.68	52.62	3,253.51
9	1.932	2.22	133.26	120.614	142.711	200	100	125.11	56.33	670.43
10	4.901	0.50	30.07	27.777	60.363	200	80	53.91	107.58	541.61
11	5.085	0.52	31.12	29.583	62.912	200	80	55.21	106.45	558.55

Con las características morfométricas e hidrológicas de las cuencas calculadas (figura 6), la red de drenaje de cada cuenca y el modelo digital de elevaciones, se estimaron los escenarios de inundación basados en el modelo hidráulico propuesto por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos (USACE, 2002) en su *software* HecRAS, que es recomendado por el CENAPRED. Este modelo hidráulico permite modelar un flujo constante unidimensional que representa el tirante de agua para una lluvia de diseño determinada.

Para ello debe construirse, en la superficie de cada cuenca, la geometría del terreno incluyendo el cauce del río, las secciones transversales y las líneas de flujo. Con esta geometría y el caudal (Q_p en m³/s) se puede realizar el cálculo hidráulico y obtener el resultado de zonas de inundación y el tirante de agua. En la Tabla 2 se señala el número de cuencas obtenidas su longitud, área, tiempo de concentración, entre otros. Se observa que el tirante de agua, calculado en m³/s, se encuentra por arriba de los 1,000 m³/s en 7 de las 11 cuencas obtenidas y en algunos casos superando los 3,000 m³/s. Finalmente, con estos resultados se pudo construir el mapa de inundaciones de la zona limítrofe.

Resultados

Como se mencionó antes, se obtuvieron 11 cuencas, que tienen en promedio un tiempo de concentración de dos horas y media, una pendiente media de 3.5 grados y gasto de 1,062.70 m³/s. Las cuencas y la dirección de los flujos virtuales

tienen una orientación del suroeste al noreste al igual que el Río Hondo. Esta orientación y flujo coinciden con lo señalado en el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región de Laguna de Bacalar, de que los aportes de agua en la Laguna de Bacalar provienen del Este (Gobierno del Estado de Quintana Roo, 2005).

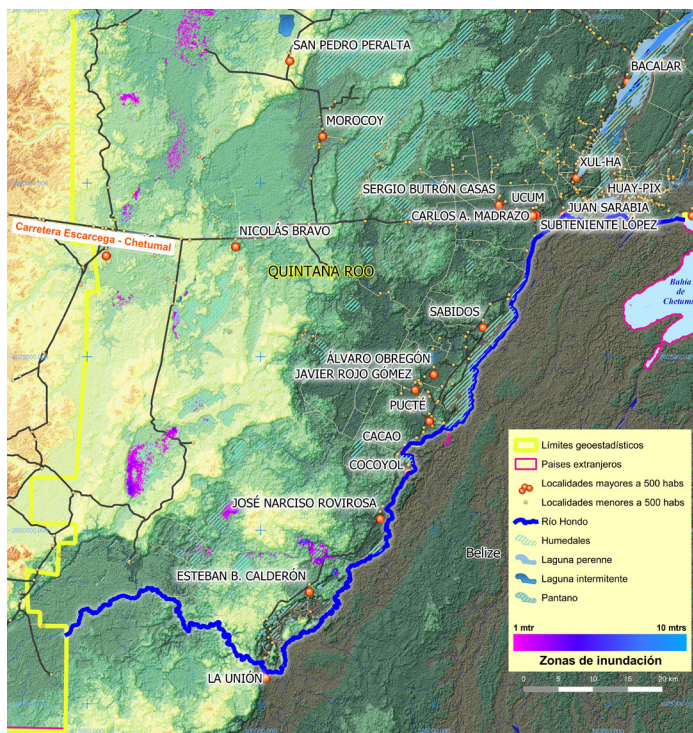
El resultado del análisis de la estimación de las zonas de inundación para la zona limítrofe de Quintana Roo y Campeche para un periodo de retorno de 100 años (a un mayor tiempo de retorno se presenta un área inundada mayor) se muestra en la Figura 8. En la escala de color, que va del morado al azul, se identifican los sitios con potencial a inundarse y la profundidad, que va desde 1 metro hasta los 10 metros. Estos sitios se encuentran en el límite de Quintana Roo y Campeche del lado izquierdo del mapa. Cercano a estos sitios, con potencial a inundaciones de un metro, se encuentran sitios con una inundación media; es decir, alrededor de 5 metros. Este tipo de inundaciones causan graves pérdidas materiales, sobre todo a la población asentada en ese territorio.

Se distinguen tres zonas de peligro por inundación pluvial y aumento del nivel freático, una de ellas al sur, sobre la carretera federal Escárcega-Chetumal (186) y cercana a la localidad de José Narciso Rovirosa. Otra se ubica al oeste de la localidad de San Pedro Peralta, donde existen tirantes de agua de hasta 7 metros, aunque en pequeñas superficies, y la tercera al norte de la localidad de Esteban B. Calderón, con tirantes de agua de hasta 17 metros. Esta última es potencialmente la más riesgosa, ya que atraviesa la carretera estatal Ucum-Unión; esta vía de comunicación es prácticamente la única vía de tránsito entre las localidades en la ribera del Río Hondo y el resto del Estado.

Las localidades en el área de estudio tienen un índice alto de marginación de acuerdo con el Consejo Nacional de Población (2010) y, además, una cuarta parte de las viviendas están construidas con materiales que se ven seriamente afectados en una inundación (madera y láminas de cartón) (INEGI, 2010).

Estos modelos son una importante herramienta de apoyo, que puede ser utilizada para la optimización de los planes de ordenamiento territorial de las ciudades, la optimización de los sistemas de alerta y emergencia, el diseño de obras de protección y la evaluación del riesgo.

Figura 8. Mapa de zonas inundables en el área de estudio



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El presente trabajo toma como punto de partida el riesgo generado a partir de las inundaciones y sus consecuencias en las poblaciones humanas. Sin embargo, cualquier metodología de análisis de riesgos debe entenderse como una herramienta para comunicar de manera abierta y transparente un entorno de responsabilidades compartidas. En cualquier caso, el análisis de riesgo debe ser capaz de capturar el impacto también de las medidas no estructurales y debe ajustarse en su alcance que este sea suficiente para proveer el nivel de confianza necesario para el tipo de decisiones que deban tomarse.

Se ha demostrado que en el área de estudio existe un potencial considerable de inundaciones debidas a las precipitaciones; esto, aunado a los flujos subterráneos de la zona y los suelos inundables, puede ser motivo de que se presenten cada vez más frecuentemente inundaciones en la región. La zona con potencial a inundarse,

encontrada cerca de la localidad de Esteban B. Calderón y que es potencialmente la más riesgosa por atravesar la única vía de comunicación del área de estudio (carretera estatal Ucum-Unión), debe ser de especial atención para los diferentes órdenes de gobierno que deberán de establecer medidas de mitigación y construir infraestructura que permita mitigar los efectos adversos de las lluvias intensas.

Las afectaciones más recientes son las ocasionadas por el paso de la tormenta tropical Cristóbal el 1 de junio de 2020, pues fue la tercera tormenta nombrada más temprana en el Océano Atlántico de esta temporada (figura 9). Se puede apreciar el paso de agua sobre la carretera Ucum-Unión, después del desborde de los cuerpos de agua y arroyos cercanos, debido a las lluvias presentadas este junio de 2020.

Figura 9. Inundación de la carretera Ucum – Unión



Fuente: Coordinación Estatal de Protección Civil del Estado de Quintana Roo (2020).

Por lo anteriormente expuesto, se debe adoptar un manejo más comprensivo y multisectorial de las cuencas, debiendo incorporar, como elemento clave en estas actividades, programas que reduzcan la vulnerabilidad a inundaciones. En el momento de los desastres, cuando muchas veces se pone en peligro la integridad de las personas, es imprescindible contar con un servicio de salud de rápido acceso; sin embargo, si las vías de comunicación son dañadas esto se hace más difícil o imposible.

La prevención ante los fenómenos de inundación es vital, ya que una buena planeación podría disminuir daños y pérdidas materiales. Sin embargo, no en todos los casos de inundación las recomendaciones y avisos se dan a tiempo o se previene de la magnitud de los fenómenos a las poblaciones. Ni en Quintana Roo ni en Campeche se han desarrollado Sistemas de Alerta Temprana (SAT) para inundaciones. Además, ambos municipios limítrofes, Othón P. Blanco (Quintana Roo) y el municipio de Calakmul (Campeche), no cuentan con su respectivo Atlas de Riesgo, ya que, como se establece por Ley General de Protección Civil, las autoridades locales, los Ayuntamientos municipales, son los primeros responsables de hacerle frente a las emergencias.

Los resultados alcanzados pueden contribuir a la planeación de acciones, obras de mitigación, desarrollo urbano y reducción del riesgo de desastres. Este tipo de análisis toma en cuenta no solo la topografía del terreno, sino también las estimaciones de lluvias máximas; por lo tanto, presentan resultados más cercanos a los que se tendrían al considerar simplemente la morfometría del terreno. Finalmente, entendemos que los sistemas hídricos son muy dinámicos y complejos, y en ellos convergen aspectos ambientales, económicos y culturales. Además, la lámina de precipitación es difícil de anticipar y esto hace que las inundaciones sean un problema muy presente en la vida de la población, y les afecte directamente de diversas formas: anegando campos de cultivos, vías de comunicación y acarreando problemas de salud pública.

Referencias bibliográficas

- Alcocer-Yamanaka, V. H., Rodríguez-Varela, J. M., Bourguett-Ortiz, V. J., Llaguno-Guilberto, O. J., & Albornoz-Góngora, P. M. (2016). Metodología para la generación de mapas de riesgo por inundación en zonas urbanas. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 33–55.
- CENAPRED (2019). Impacto económico de los principales desastres – Resumen Ejecutivo. Subdirección de Estudios Económicos y Sociales. Versión Electrónica.
- Consejo Nacional de Población. (2012). Índices de marginación por localidad 2010. Recuperado de www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Indice_de_Marginacion_por_Localidad_2010
- Gobierno del Estado de Quintana Roo. (2005). Decreto por el cual se establece el Programa de Ordenamiento de la Región Laguna de Bacalar, Quintana Roo, México (p. 124). p. 124. Chetumal.
- Iglesias, E. (2011). Atlas. Escenarios de cambio climático en la Península de Yucatán, Roger Orellana. Problemas del Desarrollo. *Revista Latinoamericana de Economía*, 43(168).
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). (2019). ¿Qué es una cuenca? Recuperado el 20 de diciembre de 2020, de 01 de agosto de 2019 website: <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-es-una-cuenca-211369>
- INEGI, 2010. Censo de Población y Vivienda. (2010). Principales resultados por localidad, (Sistemas de Consulta en línea), <http://www.inegi.gob.mx>.
- INEGI. Dirección General de Geografía. (2006). Sistema de Descarga del Continuo de Elevaciones Mexicano, (sistemas de consulta en línea), <http://www.inegi.gob.mx>.
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. En *Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.
- OCHA. (2020). Desastres Naturales en América Latina y El Caribe 2000-2019. Recuperado de http://www.sld.cu/alerias/pdf/sitios/urgencia/10desastres_naturales.pdf
- Orellana, R., G. Islebe, C. Espadas. (2003). Presente, pasado y futuro de los climas de la Península de Yucatán. En: P. Colunga García Marín, A. Larqué Saavedra (ed.), *Naturaleza y Sociedad en el Área Maya*. Academia Mexicana de Ciencias y Centro de Investigación Científica de Yucatán. México. pp. 37-52
- Oswald, U. (2010). Cambio climático, conflicto sobre recursos y vulnerabilidad social. En Delgado, G., Gay C. e Ímaz, M. (Ed). *México frente al cambio climático: retos y oportunidades*. UNAM, Centro de Ciencias de la Atmósfera: Centro de Investigaciones Interdisciplinarias en Ciencias y Humanidades:

- Programa de Investigación en Cambio Climático: Programa Universitario de Medio Ambiente, 2010. pp. 52-80. ISBN 978-607-02-1879-8.
- Palacio Aponte, A. G., & Frausto Martínez, Ó. (2018). Caracterización hidrogeomorfológica de geoformas kársticas epigeas y amenaza de inundación en el estado de Campeche. En *Riesgo de desastres en México: eventos hidrometeorológicos y climáticos*. Jiutepec, Mor. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2018. 331-353 pp. ISBN 978-607-8629-03-9.
- Salas, M. (2014). Metodología para la elaboración de mapas de riesgos por inundación en zonas urbanas. Ciudad de México: CENAPRED.
- Salas, M. y Jiménez, M. (2019). Inundaciones. *Serie Fascículos*. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. CENAPRED. Versión electrónica.
- SCT. (2015). Isoyetas de intensidad - duración - periodo de retorno para la República Mexicana [en línea] Disponible en: <http://www.sct.gob.mx/carreteras/direccion-general-de-servicios-tecnicos/isoyetas/>. Accesado el 25 de septiembre de 2020.
- UNDRR. (2018). *Pérdidas económicas, pobreza y Desastres 1998-2017* (Vol. 7).
- United States Army Corps of Engineers USACE, 2002. HEC-RAS: River analysis system hydraulic reference manual, Hydrologic Engineering Center.
- Woitrin-Bibot, E., Martínez-Arredondo, J. C., & Ramos-Arroyo, Y. R. (2015). Crecimiento urbano e incremento de riesgos hidrológicos en la ciudad de Guanajuato, México. *L'Ordinaire des Amériques* [En línea], 218. <https://doi.org/https://doi.org/10.4000/orca.1937>

Capítulo VI

Análisis de degradación de la tierra en las cuencas hidrográficas de los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán, Jalisco, México

*Sanchez Casanova, Dennis*¹, *Cruz Romero, Bartolo*^{1,2}, *Díaz Gómez Romina*³,
*Morales Hernández, Julio Cesar*⁴, *Téllez López, Jorge*^{1,2},
*Carrillo González, Fátima Maciel*²

¹ Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa. Laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad. Dirección electrónica: dennis.sanchez32.ds@gmail.com

² Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa, Cuerpo Académico: UDG- CA-1014.

³ Cátedra de Manejo de Cuencas Hidrográficas. CEIDE. FCAYF. Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

⁴ Universidad de Guadalajara, Centro Universitario de la Costa, Cuerpo Académico: UDG- CA-303.

Resumen

En el marco del ODS 15 y utilizando insumos nacionales de carácter geográfico, biológico y ambiental; en el complemento *Trends.Earth* se calculó la proporción de tierra que se degradó en el período 2002 a 2014, analizando e integrando los subindicadores de: 1) tendencias en la productividad primaria de la vegetación, 2) cobertura de la tierra y 3) carbono orgánico del suelo, propuestos en la *Good Practice Guidance* (GPG) para monitorear el indicador ODS 15.3.1. Como resultado, se obtuvo que en el período de análisis el 8.1% (59,230.1 ha) de la tierra del área de estudio se degradó y este proceso ocurrió principalmente en las cuencas de los ríos Tomatlán y San Nicolás (44,558.39 ha) pertenecientes al municipio de Tomatlán, relacionado a cambios de uso de suelo por actividad agropecuaria. Por otro lado, en el 50.8% (371,628.2 ha) del área se redujo la degradación debido a una mejora relacionada al subindicador de productividad; ya que gran parte la zona de estudio se encuentra en proceso de recuperación o madurez de la vegetación, probablemente relacionado a cambios en la demografía local y diversificación de las actividades económicas de la región.

La degradación se distribuyó principalmente en pendientes de 1-12% (suave y con lomadas), seguido de áreas accidentadas (12-20%), donde se concentran las principales actividades económicas y centros poblacionales. Teniendo en cuenta escenarios hidrometeorológicos con eventos extremos y de mayor intensidad en las precipitaciones y periodos de sequía, que influyen en la productividad de los suelos, disponibilidad de los recursos hídricos y vulnerabilidad ambiental; es necesario monitorear la degradación de la tierra, así como generar insumos de mayor precisión para generar estrategias de adaptación en la región ante el cambio climático considerando el crecimiento poblacional y económico.

Palabras Clave: *Degradación, Productividad primaria, Cuencas.*

Introducción

La tierra es definida como un área de la superficie terrestre que abarca los atributos de la biosfera, incluye interacciones de los componentes fisiográficos, climáticos e hidrológicos, así como la biodiversidad y resultados físicos de la actividad antrópica (SEMARNAT, 2011; IUCN, 2015). La degradación de tierras resulta de la combinación de procesos naturales, como fenómenos hidrometeorológicos y factores de origen antrópico que ocasionan pérdida o disminución de la productividad biológica o económica. Además, puede ocasionar deterioro de la calidad y cantidad de recursos hídricos y desertificación, considerada como un proceso de degradación ecológica (SEMARNAT, 2011; Sims *et al.*, 2017). A diferencia del concepto de degradación del suelo, el cual sólo considera su salud ambiental (propiedades físicas y químicas), el concepto de degradación de tierra tiene un alcance más amplio; ya que considera la capacidad del ecosistema para proporcionar bienes y servicios biológicos, hidrológicos, sociales y económicos (FAO, 2011).

Se han planteado diferentes objetivos mundiales y regionales; así como iniciativas para detener y revertir la degradación de la tierra y restaurarla, una es la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible y los Objetivos del Desarrollo Sostenible (ODS) (Sims *et al.*, 2019). Debido a que los países varían en su capacidad para medir y monitorear la degradación de la tierra, se publicó la *Good Practice Guidance* (GPG) que propone analizar 1) tendencias en productividad primaria de la vegetación, 2) cambios de cobertura de la tierra y 3) carbono orgánico del suelo (Sims *et al.*, 2017), ofreciendo un enfoque para evaluar las condiciones específicas de degradación de la tierra e informar sobre el indicador "Proporción de tierra que se degrada sobre la superficie total" (ODS 15.3.1) (Sims *et al.*, 2017). Al mismo tiempo, la plataforma *Trends.Earth* (<http://trends.earth/docs/en/>) desarrollada por *Conservation International* como parte del proyecto "Habilitando el uso de fuentes de datos globales para evaluar y monitorear la degradación de la tierra en múltiples escalas " se utiliza para calcular el indicador ODS 15.3.1

(Sims *et al.*, 2019; Giuliani *et al.*, 2020). Sin embargo, Pasquarella *et al.*, (2016) y Pettorelli *et al.*, (2017) mencionan que existen limitaciones en el uso de esta herramienta en función de los resultados; ya que presenta menor resolución espacial y temporal para capturar una mejor dinámica de la degradación de la tierra.

En México las principales causas de degradación de la tierra son el cambio de uso de suelo hacia la agricultura y el uso pecuario; ambas con 17.5%, seguidas por la deforestación (7.4%); estos procesos están relacionados con la reducción de la cubierta vegetal (SEMARNAT, 2011). Alrededor del 90.7% de la superficie nacional presenta algún grado de degradación y cerca de la mitad del país tiene problemas de degradación severa (SEMARNAT, 2011; CONAFOR-UACH, 2013). A nivel nacional se ha calculado el indicador 15.3.1, reportando 32.84% de superficie degradada y 24.05% mejorada (Ruiz, 2019).

En particular, la costa de Jalisco es un territorio donde se desarrollan cultivos de riego y de temporal, en los cuales destacan los frutales como sandía, piña, tomate, papaya, limón y plátano. Estas actividades, cuando no se realizan aplicando buenas prácticas agrícolas, son consideradas en la definición por la (FAO e ITPS, 2015) de la degradación del suelo como procesos que disminuyen la productividad biológica y su capacidad para sostener la provisión de recursos. De acuerdo con SEMADET (2018) en las cuencas que integran esta área existen prácticas como el uso de suelo agrícola, forestal y ganadero, que consisten en la reducción de la vegetación, disminuyendo su capacidad de retener los sedimentos y nutrientes que llegan al mar, incrementando los efectos del cambio climático global.

Hasta el momento no se han realizado análisis de degradación de tierras a escala de cuencas hidrográficas en estos municipios, lo cual es clave para el desarrollo de estrategias de adaptación e identificación de áreas prioritarias de restauración. A su vez, la aplicación de metodologías espaciales que incluyan la comparación entre cuencas, proporciona información base para la toma de decisiones en el territorio (Cotler *et al.*, 2010; Díaz Gómez, 2015).

En este contexto, este estudio propone: (i) cuantificar la degradación de la tierra (ODS 15.3.1) a través del uso de la herramienta *Trends.Earth* a escala de cuencas hidrográficas en los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán para el periodo 2002-2014. (ii) Caracterizar el patrón espacial de las áreas degradadas a través de la zonificación en relación al relieve, identificando áreas potenciales de degradación y comparando a nivel de subcuencas.

Área estudio

El área de estudio incluye a las subcuencas que integran los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán. Dichas subcuencas corresponden a los ríos Tecomala (75

820.68 ha), Tecuán (63 994.34 ha), Mismaloya (78 548.72 ha), Tomatlán (235 427.99 ha) y San Nicolás (278 051.61 ha), que comprenden un área de 731 843.35 ha (INEGI, 2010) (figura 1).

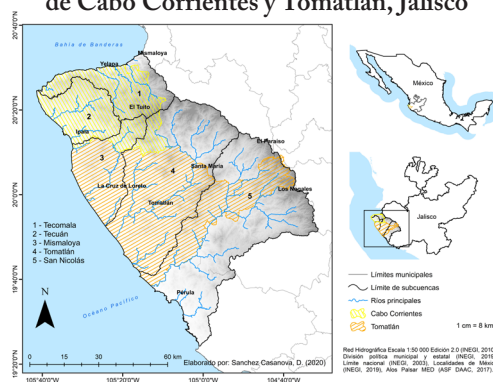
El clima es considerado cálido subhúmedo con lluvias en verano, también se encuentra el clima semiárido cálido en la parte de la costa de Tomatlán, la precipitación promedio anual corresponde a rangos de 600-1 800 mm y en las zonas bajas de las subcuencas se presentan valores de 600 a 1,200 mm; por otro lado, en las partes medias y altas se registran valores de 1,200 hasta 1,800 mm de promedio anual (Cuervo Robayo *et al.*, 2014; Viera Mejía y Michel Canchola, 2020).

Predominan la vegetación de selva mediana subcaducifolia y selva baja caducifolia, sobre todo en la parte occidental o de costa; por otro lado, en la parte oriental, en las montañas, se encuentran bosques mixtos de pino-encino, pertenecientes a las cadenas montañosas de la Sierra Madre Oriental y la Faja Volcánica Transmexicana (Viera Mejía y Michel Canchola, 2020).

Respecto al tipo de suelo, predomina el Regosol (411,017.8 ha), seguido por Cambisol (132,640.8 ha), Leptosol (79,528.0 ha), Phaeozem (50,623.5 ha) y en menor extensión se encuentran zonas con Luvisol (21,590 ha), Umbrisol (9,813.8 ha), Fluvisol (9,347.9 ha), Vertisol (4,810.6 ha), Solonchak (3,569.5 ha) y Arenosol (2,094.7 ha) (INEGI, 2014).

La tenencia de la tierra corresponde en su mayoría a propiedad privada, las comunidades más pobladas comprenden el poblado de El Tuito y Tomatlán con 3,211 y 9,026 habitantes, respectivamente (INEGI, 2010); la mayor parte del suelo tiene un uso agropecuario, siendo aproximadamente 204,900 ha en mayor medida en el municipio de Tomatlán. En Cabo Corrientes predomina el uso forestal, con 146,700 ha (Viera Mejía y Michel Canchola, 2020).

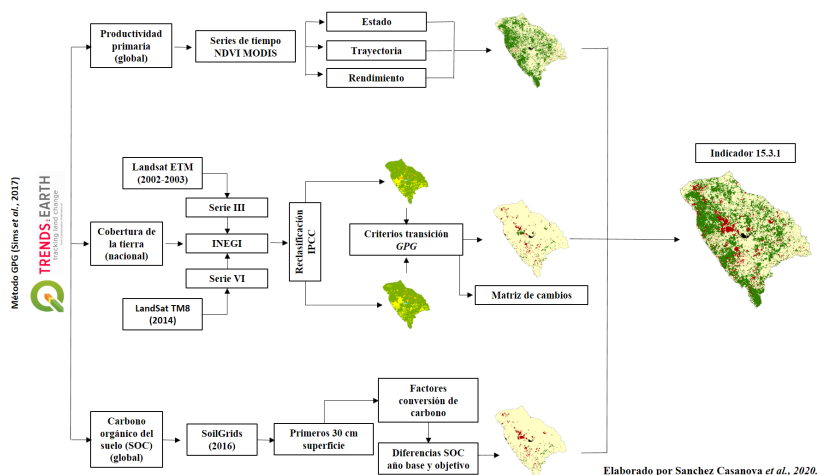
Figura 1. Subcuencas hidrológicas que comprenden los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán, Jalisco



Cálculo de subindicadores de degradación de la tierra

El indicador ODS 15.3.1 (es una cuantificación binaria (degradada/no degradada) basada en el análisis de datos disponibles para tres subindicadores: 1) tendencias en productividad primaria de la vegetación, 2) cobertura de la tierra y 3) carbono orgánico del suelo propuestos en la GPG (Sims *et al.*, 2017). Para el cálculo de los tres subindicadores de degradación de la tierra se utilizó el complemento *Trends.Earth* en QGIS 2.18, la metodología implementada se resume en la Figura 2. Se realizaron los cálculos para cada subindicador, se obtuvo la proporción y superficie del territorio degradado por cuenca y para el área de estudio en el período 2002-2014.

Figura 2. Metodología implementada en el complemento *Trends.Earth* para calcular el indicador 15.3.1



1) Tendencias en productividad primaria de la vegetación

La productividad de la tierra muestra los efectos de los cambios en los ecosistemas sobre el crecimiento de la biomasa vegetal, que puede ser medida a través de los cambios en productividad primaria neta anual (Sims *et al.*, 2017). Los cambios en productividad primaria se obtuvieron por medio del complemento *Trends.Earth*, el cual calculó y combinó tres medidas de cambio derivadas de series de tiempo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI): trayectoria, estado y rendimiento (Conservation International, 2018). *Trends.Earth* utiliza productos de MODIS obtenidos cada dos semanas (resolución de 250 m).

2) Cobertura de la tierra

Se refiere a la cobertura física que describe los tipos de vegetación, cuerpos de agua y áreas antrópicas; es decir, refleja el uso de los recursos (Sims *et al.*, 2017). Se reclasificaron las capas de “Uso de suelo y vegetación” series III (2002) y VI (2014) a las clases de cobertura del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (Sims *et al.*, 2017; Ruiz, 2019), de acuerdo a la información de las guías para la interpretación de cartografía, usos del suelo y vegetación (INEGI, 2009 y 2017). Para determinar si el cambio indicó mejora o degradación se tomó en cuenta la matriz de cambio de cobertura predeterminada en *Trends.Earth* y recomendada por la GPG (Sims *et al.*, 2017; Conservation International, 2018; Ruiz, 2019).

3) Carbono orgánico del suelo (COS)

El carbono orgánico del suelo (COS) es la cantidad de carbono almacenado en el suelo (Sims *et al.*, 2017). El contenido de COS depende del equilibrio entre la tasa de entrada de carbono orgánico y la tasa de salida (CO₂) a causa de la descomposición microbiana (FAO, 2017). Este subindicador se determinó utilizando los rásteres reclasificados de cobertura de suelo, además de una capa con los valores de COS para los primeros 30 cm de superficie obtenida del conjunto de datos *SoilGrids250m* (Ruiz, 2019). Los cambios de COS se estimaron a partir de factores de conversión de COS para cambios de uso de suelo recomendados por el IPCC, se aplicó el factor que corresponde al clima húmedo tropical (0.48) (United Nations Framework Convention on Climate Change, 2010; Conservation International, 2018). Se calcularon las diferencias de COS entre el año base y el año objetivo, las zonas que experimentaron pérdida en COS del 10% o más, se consideraron degradadas y aquellas con aumento del 10% o más, como mejoradas (Conservation International, 2018).

Indicador ODS 15.3.1

La integración de los subindicadores se realizó siguiendo la regla uno fuera-todos fuera; es decir, si un área fue identificada como degradada por cualquiera de los subindicadores, se le consideró como potencialmente degradada (Conservation International, 2018).

Caracterización de la degradación de la tierra

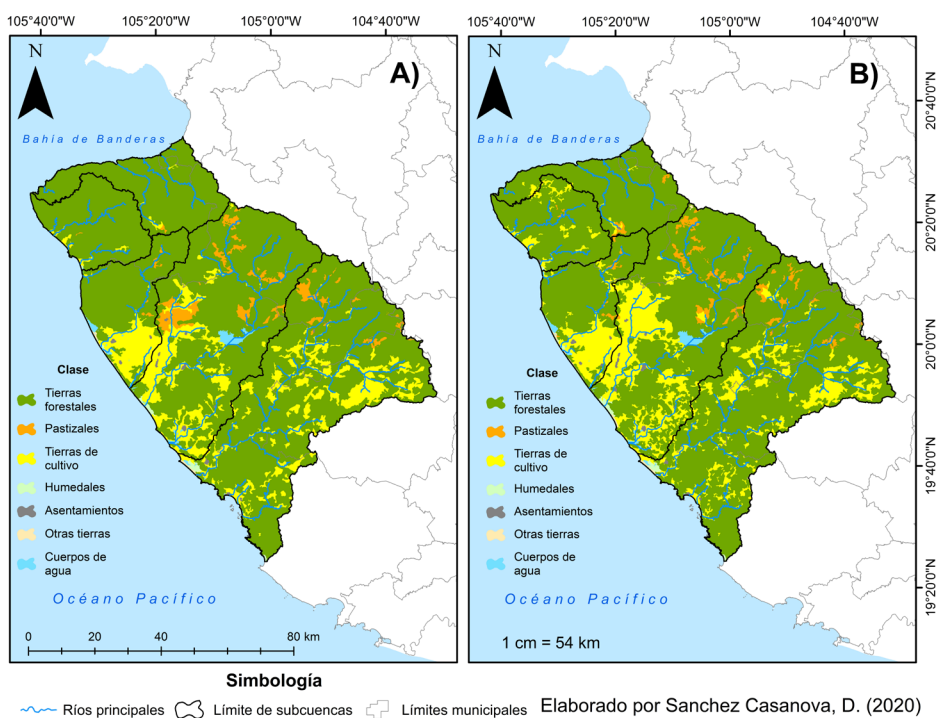
Para caracterizar la distribución espacial de la degradación y contribuir a los planes de ordenamiento ecológico territorial, se cuantificó la degradación con base en

las pendientes; utilizando el modelo de elevación digital del satélite ALOS PAL-SAR (ASF DAAC, 2017) y los rangos de relieve propuestos por López Cadenas de Llano (López Cadenas de Llano, 1998).

Resultados

A partir de la reclasificación de las capas de “uso de suelo y vegetación” se obtuvieron los mapas de cobertura de la tierra correspondientes a los años 2002 y 2014 (figura 3).

Figura 3. Cobertura de la tierra en los años 2002 (A) y 2014 (B)



Matriz de cambios

En el área de estudio la tendencia correspondió a la disminución de tierras forestales y pastizales con pérdidas de 19,830.2 y 4,165.2 ha, respectivamente; por otro lado, las tierras de cultivo aumentaron 22,604.8 ha (tabla 1). Los cambios que más

destacaron fueron tierras forestales a tierras de cultivo (32,759 ha), tierras forestales a pastizales (4,936.8 ha) y tierras de cultivo a tierras forestales (17,264 ha).

Tabla 1. Matriz de cambios (ha) de cobertura de la tierra del 2002 (año de referencia) al 2014 (año objetivo) en las cuencas hidrográficas que integran a los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán. Tierras forestales (TF), Pastizales (PA), Tierras de cultivo (TC), Humedales (HU), Asentamientos (AS), Otras tierras (OT) y Cuerpos de agua (CA)

Tipo de cobertura en el año de referencia (2002)		Tipo de cobertura en el año objetivo (2014)								
	TF	PA	TC	HU	AS	OT	CA	Total	Pérdida	
	TF	549 104.0	4 936.8	32 759.0	29.2	60.6	104.4	224.3	587 218.3	38 114.3
	PA	870.1	12 168.7	8 242.1		5.1			21 285.9	9 117.2
	TC	17 264.0	12.4	94 958.9	255.7	492.3	433.5	84.4	113 501.3	18 542.4
	HU	9.8		7.9	1 596.0		16.7	23.8	1 654.2	58.2
	AS	2.0	2.7	63.9		949.4			1 018.0	68.6
	OT	0.6		1.0	2.0		1 043.1	6.0	1 052.8	7.7
	CA	137.6		73.3	51.0		22.7	5 222.3	5 506.9	284.7
	Total	567 388.1	17 120.7	136 106.1	1 933.8	1 507.3	1 620.5	5 560.8	731 374.3	
Ganancia	18 284.1	4 952.0	41 147.3	337.8	558.0	577.4	338.5			

Nota: las celdas en blanco significan 0 ha.

Subindicadores de degradación de la tierra

Variabilidad de Productividad primaria

El 1.7% (12,109.7 ha) del área de estudio presentó degradación de la productividad y el 52.9% (387,168.7 ha) mejoró en este criterio (figura 4). Se evidencia a mayor resolución espacial áreas mejoradas y degradadas (figura 5). La subcuenca con mayor superficie degradada fue la del río San Nicolás con 6,402.0 ha (2.3%) (tabla 2).

Tabla 2. Resumen de cambio en productividad para cada una de las subcuencas que conforman los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán

Subcuenca		Área	Mejorado	Estable	Degradado	Sin datos
Río Tecomala	ha	75 820.7	35 537.5	38 426.4	1 059.1	797.7
	%	100	46.9	50.7	1.4	1.1
Río Tecuán	ha	63 994.3	44 878.9	17 985.2	525.2	605.0
	%	100	70.1	28.1	0.8	0.9

Río Mismaloya	ha	78 548.7	56 479.7	18 466.7	1 951.7	1 650.7
	%	100	71.9	23.5	2.5	2.1
Río Tomatlán	ha	235 428.0	125 035.8	104 160.0	2 169.8	4 062.4
	%	100	53.1	44.2	0.9	1.7
Río San Nicolás	ha	278 051.6	125 227.0	144 740.3	6 402.0	1 682.4
	%	100.0	45.0	52.1	2.3	0.6
Área total de estudio	ha	731 843.3	387 168.7	323 794.9	12 109.7	8 770.1
	%	100	52.9	44.2	1.7	1.2

Figura 4. Mapa del subindicador de productividad en las subcuencas hidrográficas que integran a los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán.

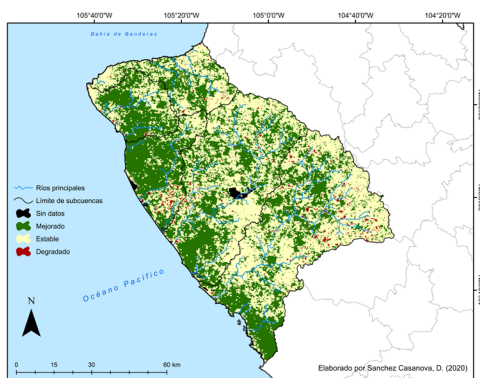
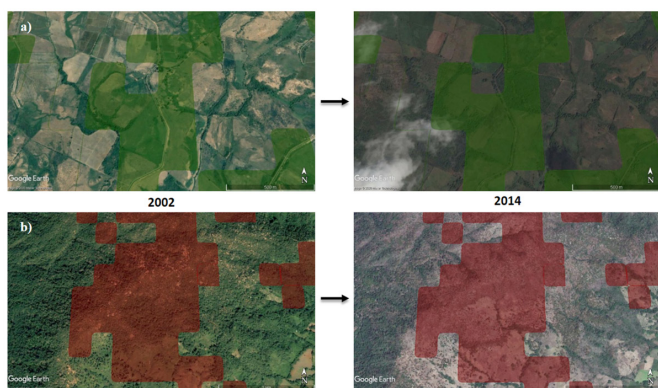


Figura 5. a) Zonas con mejora en productividad primaria
b) Zonas con degradación en productividad primaria



Cobertura de la tierra

El 5.5% (40,028.3 ha) del área de estudio fue degradado (tabla 3) (figura 6). La subcuenca del río Tomatlán (17,604.4 ha) presentó mayor territorio degradado seguido por la del río San Nicolás (10,981.1 ha). Se presentan ejemplos locales de degradación (figura 7).

Tabla 3. Resumen de cambio de cobertura de la tierra para cada una de las subcuencas que conforman a los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán

Subcuenca		Área	Mejorado	Estable	Degradado	Sin datos
Río Tecomala	ha	75 820.7	57.4	73 619.9	1 786.9	356.3
	%	100	0.1	97.1	2.4	0.5
Río Tecuán	ha	63 994.3	447.8	57 853.6	5 604.7	88.2
	%	100	0.7	90.4	8.8	0.1
Río Mismaloya	ha	78 548.7	536.4	72 729.3	4 050.6	1 232.5
	%	100	0.7	92.6	5.2	1.6
Río Tomatlán	ha	235 428.0	11 973.0	201 891.0	17 604.4	3 959.6
	%	100	5.1	85.8	7.5	1.7
Río San Nicolás	ha	278 051.6	145 36.8	251 784.0	10 981.1	749.8
	%	100.0	5.2	90.6	3.9	0.3
Área total de estudio	ha	731 843.3	27 553.6	657 888.4	40 028.3	6 373.1
	%	100	3.8	89.9	5.5	0.9

Figura 6. Mapa del subindicador de cobertura de la tierra en las subcuencas hidrográficas que integran a los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán

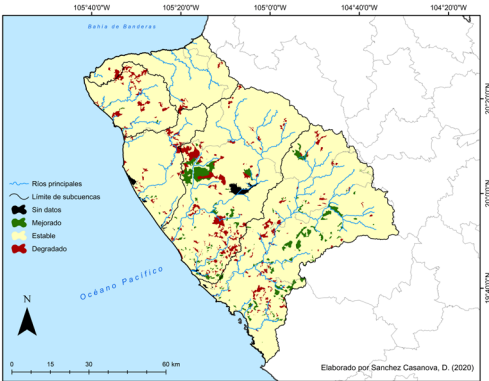


Figura 7. Degradación de la tierra por a) Uso pecuario b) Cambios de coberturas c) Incendios forestales



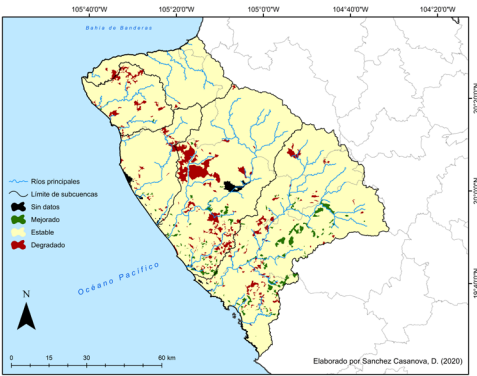
Carbono orgánico del suelo

El 91% (665,877.3 ha) del área de estudio no registró cambios en COS, sólo el 5.8% (42,693.8 ha) presentó degradación (figura 8). La subcuenca con mayor territorio degradado fue la del río Tomatlán (22,137.3 ha) seguido por la del río San Nicolás (11,062.9 ha) (tabla 4).

Tabla 4. Resumen de cambio en carbono orgánico del suelo para cada una de las subcuencas que conforman a los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán

Subcuenca		Área	Mejorado	Estable	Degradado	Sin datos
Río Tecomala	ha	75 820.7	55.0	74 145.1	1 063.8	556.8
	%	100	0.1	97.8	1.4	0.7
Río Tecuán	ha	63 994.3	334.7	58 275.4	5 246.3	137.9
	%	100	0.5	91.1	8.2	0.2
Río Mismaloya	ha	78 548.7	467.7	73 875.7	3 182.8	1 022.5
	%	100	0.6	94.1	4.1	1.3
Río Tomatlán	ha	235 428.0	4 951.5	205 854.9	22 137.3	2 484.3
	%	100	2.1	87.4	9.4	1.1
Río San Nicolás	ha	278 051.6	12 597.3	253 711.4	11 062.9	680.0
	%	100	4.5	91.2	4.0	0.2
Área total de estudio	ha	731 843.3	18 406.6	665 877.3	42 693.8	4 865.7
	%	100	2.5	91.0	5.8	0.7

Figura 8. Mapa del subindicador de carbono orgánico del suelo en las subcuencas hidrográficas que integran a los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán



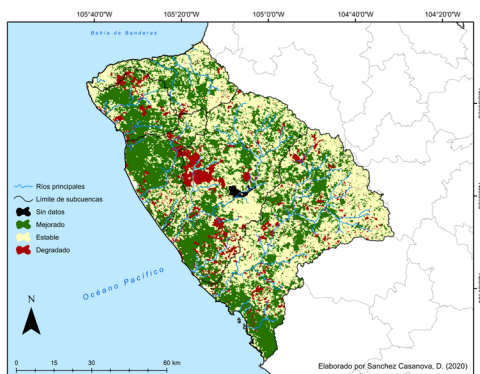
Indicador ODS 15.3.1

Una vez integrados los subindicadores se obtuvo que el 8.1% (59,230.1 ha) del área de estudio presentó degradación de la tierra (figura 9) (tabla 5). La subcuenca con mayor territorio degradado fue la del río Tomatlán (26,313.8 ha) seguido por la del río San Nicolás (18,244.6 ha).

Tabla 5. Resumen del indicador ODS 15.3.1 para cada una de las subcuencas que conforman a los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán

Subcuenca		Área	Mejorado	Estable	Degradado	Sin datos
Río Tecomala	ha	75 820.7	35 011.3	37 319.9	2 754.8	734.7
	%	100	46.2	49.2	3.6	1.0
Río Tecuán	ha	63 994.3	41 491.2	16 045.1	6 076.9	381.1
	%	100	64.8	25.1	9.5	0.6
Río Mismaloya	ha	78 548.7	53 972.7	17 004.3	5 838.3	1 733.5
	%	100	68.7	21.6	7.4	2.2
Río Tomatlán	ha	235 428.0	114 157.4	91 160.7	26 313.8	3 796.1
	%	100	48.5	38.7	11.2	1.6
Río San Nicolás	ha	278 051.6	126 986.2	131 791.2	18 244.6	1 029.6
	%	100.0	45.7	47.4	6.6	0.4
Área total de estudio	ha	73 1843.3	371 628.2	293 334.8	59 230.1	7 650.2
	%	100	50.8	40.1	8.1	1.0

Figura 9. Mapa del indicador ODS 15.3.1 en las subcuencas hidrográficas que integran a los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán



Degradación de la tierra en relación al relieve

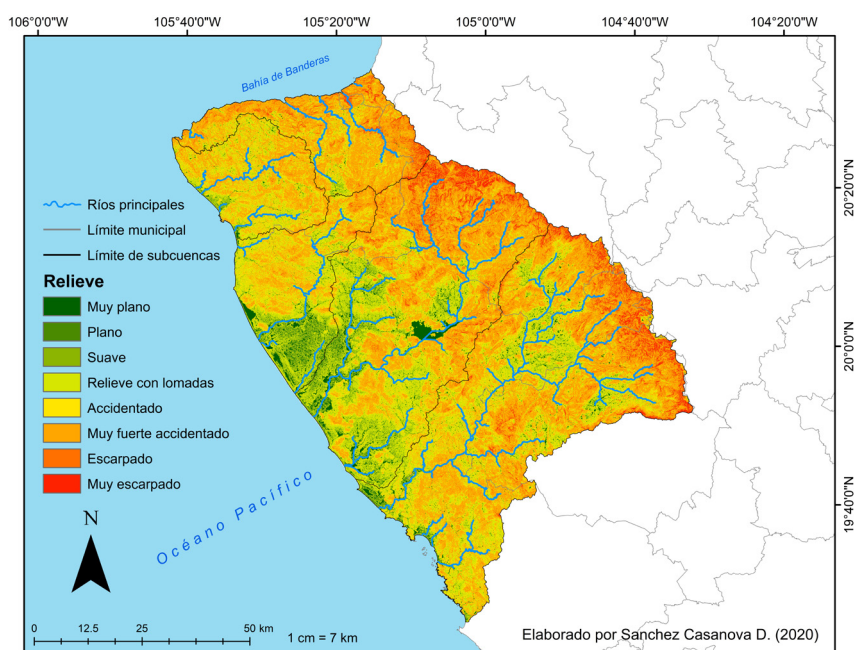
El área de estudio está compuesta principalmente por relieves muy fuerte accidentados (285,068.2 ha), con lomadas (178,162 ha) y accidentados (138,302.1 ha). La degradación de tierras se registró principalmente relieves suaves con 5,742.6 ha (16.6%), planos con 898.2 ha (15.9%) y con lomadas con 25,401 ha (14.3%) (tabla 6); en menor medida se registró en relieves accidentados con 10,698.2 ha (7.7%) y muy fuerte accidentados con 11,572.8 ha (4.1%) (figura 10).

Tabla 6. Resumen del indicador ODS 15.3.1 para los distintos tipos de relieve que conforman a los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán

Relieve	Categoría	Mejorado	Estable	Degradado	Sin datos	Total
Muy plano	ha	12 014.0	8 786.3	3 521.3	2 435.3	26 756.9
	%	44.9	32.8	13.2	9.1	100.0
Plano	ha	2 713.6	1 988.2	898.2	39.9	5 640.0
	%	48.1	35.3	15.9	0.7	100.0
Suave	ha	16 932.5	11 828.0	5 742.6	122.8	34 625.9
	%	48.9	34.2	16.6	0.4	100.0
Relieve con lomadas	ha	95 352.7	57 002.9	25 401.0	405.4	178 162.0
	%	53.5	32.0	14.3	0.2	100.0
Accidentado	ha	77 635.9	49 767.7	10 698.2	200.4	138 302.1
	%	56.1	36.0	7.7	0.1	100.0

Muy fuerte accidentado	ha	146 081.1	127 227.4	11 572.8	187.0	285 068.2
	%	51.2	44.6	4.1	0.1	100.0
Escarpado	ha	16 620.2	27 145.6	1 097.6	2.2	44 865.6
	%	37.0	60.5	2.4	0.0	100.0
Muy escarpado	ha	4 278.3	9 588.7	298.4	0.0	14 165.5
	%	30.2	67.7	2.1	0.0	100.0
Total	ha	371 628.2	293 334.8	59 230.1	3 393.1	727 586.2

Figura 10. Relieve en las cuencas hidrográficas que integran a los municipios de Cabo Corrientes y Tomatlán



Discusión

De acuerdo al indicador 15.3.1 la subcuenca con mayor superficie degradada fue la del río Tomatlán, seguida por la del río San Nicolás; por otro lado, el 50.8% (371,628.2 ha) del área del área analizada presentó mejora de la tierra en el período 2002-2014. Esta mejora podría estar asociada al subindicador de productividad, ya que gran parte de la zona se encuentra en proceso de recuperación o madurez a causa del abandono de tierras de cultivos y pastizales por la diversifica-

ción de las actividades económicas y la disminución de la productividad del suelo (Bonilla-Moheno y Mitchell Aide, 2020; López Pérez y Cruz Romero, 2020). En algunas zonas se ha observado que la vegetación de selva mediana subcaducifolia ha prevalecido sobre el bosque de pino-encino; ya que presenta una mayor capacidad de propagarse vegetativamente, adaptación desarrollada a partir de la presencia de fuegos recurrentes y períodos de sequía prolongados (Rodríguez Sánchez *et al.*, 2019). La prevalencia de esta cobertura se debe probablemente a los cambios relacionados con la demografía local y la modificación de los sectores económicos; cabe resaltar que la degradación de tierras se relaciona con patrones de migración y marginación (alto y muy alto) (2010) (CONABIO, 2014 a y b; Gauna Ruiz de León, 2019) que resultan en los patrones de cambio de uso de suelo descritos en la Tabla 5. Esto coincide con lo reportado por Kolb *et al.*, (2018) quien indica que los niveles de marginación medios a altos se relacionan con la deforestación de bosques tropicales para agricultura y degradación de los ecosistemas templados; además de la regeneración de estos bosques a partir de pastizales.

En esta área de estudio Ruiz (2019) registró el 62.53% como superficie mejorada, 25.33% estable y 11.73% degradada y se considera que la diferencia con nuestros resultados se debe a los criterios de clasificación, en los cuales la autora consideró la vegetación secundaria como pastizales en el año 2002 y como tierras forestales en 2014. Ello puede llevar a una sobreestimación de la mejora en la productividad primaria.

La mayoría de las zonas degradadas se distribuyen principalmente en relieve suave, plano y con lomadas; seguido por relieve accidentado y muy fuerte accidentado, factor a tener en cuenta debido a que la ganadería extensiva se desarrolla en laderas y la agricultura en llanuras aluviales, propiciando procesos de erosión e inundaciones y afectando principalmente a las coberturas de selva baja caducifolia y selva mediana subcaducifolia, proceso que puede ir en aumento, ya que los pastizales por efecto de la ganadería están desplazando los cultivos básicos tradicionales (Kolb *et al.*, 2018; Michel Canchola *et al.*, 2019).

Es importante tener especial atención en las subcuencas de estos municipios; ya que han sido reportadas con procesos de pérdida de fertilidad (Tomatlán, San Nicolás y Mismaloya) (SEMARNAT, 2004), degradación química (Tomatlán y Tecuán) y erosión hídrica (San Nicolás y Mismaloya) (Garrido y Cotler, 2010). Teniendo en cuenta que México es vulnerable a efectos del cambio climático como variación en la frecuencia e intensidad de fenómenos hidrometeorológicos y sequías (SEMARNAT, 2016); es indispensable evitar que aumente la proporción de tierra degradada, de no ser así comprometeremos el funcionamiento de los ecosistemas de la región, generando impactos como pérdida de biodiversidad y desertificación, además de mayor vulnerabilidad hídrica y riesgo ante desastres naturales. Lo anterior, conlleva a una reducción del desarrollo socio económico de la región.

Conclusión

El modelo *Trends.Earth* estimó la degradación de la tierra a partir de los indicadores propuestos, proporcionando información confiable; sin embargo, para disminuir la incertidumbre de los resultados es necesario generar insumos de mayor resolución y de años recientes. Además, se debe incrementar la verificación en campo de los criterios de degradación. La metodología puede ser utilizada en otras áreas; ya que es establecida en la Guía de Buenas Prácticas para monitorear el indicador 15.3.1.

De acuerdo con los resultados de este estudio, se considera que los factores socioeconómicos son los principales motores de la degradación; dada la tendencia observada de la actividad agropecuaria se espera que las tierras degradadas aumenten, es por ello que se recomienda realizar una evaluación de los tipos de degradación de la tierra en las cuencas que integran a estos municipios y proponer tecnologías de manejo sostenible, para prevenir y mitigar procesos de degradación e integrarlas a la planificación territorial, tomando en cuenta factores físicos, biológicos y socioeconómicos de la región para contrarrestar el impacto del cambio climático global.

Literatura citada

- Bonilla Moheno, M. y Mitchell Aide, T. (2020). Beyond deforestation: Land cover transitions in Mexico. *Agricultural Systems* 178 (2020) 102734.
- CEA. (2015a). Ficha técnica hidrológica municipal Cabo Corrientes. Comisión Estatal del Agua Jalisco. https://www.ceajalisco.gob.mx/doc/fichas_hidrologicas/region12/cabo%20corrientes.pdf
- CEA. (2015b). Ficha técnica hidrológica municipal Tomatlán. Comisión Estatal del Agua Jalisco. https://www.ceajalisco.gob.mx/doc/fichas_hidrologicas/region11/tomatlan.pdf
- CONABIO. (2014a). "Población en condición de pobreza por municipio, 2010", escala: 1:250000. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. México, D.F.
- CONABIO. (2014b). "Migración por localidad, 2010", escala: 1:1. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Datos estadísticos del 2010, del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). México, D.F.
- CONAFOR-UACH. (2013). Línea Base Nacional de Degradación de Tierras y Desertificación. Informe final. Comisión Nacional Forestal y Universidad Autónoma Chapingo, Zapopan, Jalisco.
- Conservation International. (2018). Trends.Earth Trackin land change. <http://trends.earth/docs/en/>
- Cotler, H., Garrido, A., Bunge, V. y Cuevas, M. L. (2010). Las cuencas hidrográficas de México: Priorización y toma de decisiones. En Cotler Ávalos, H. (Coord.) *Las cuencas hidrográficas de México diagnóstico y priorización* (pp. 210-215). México.
- Cuervo Robayo, A. P., Téllez Valdés, O., Gómez Albores, M. A., Venegas Barrera, C. S., Manjarrez, J., Martínez Meyer, E., (2014). "Precipitación anual en México (1910-2009)", escala: 1:1000000. modificado por CONABIO (2015). México, D. F.
- Díaz Gómez, R. (2015). Análisis de la vulnerabilidad a cambios climáticos y de uso del territorio de las cuencas hidrológicas del faldeo oriental de la sierra del Aconquija y del Sudoeste, Tucumán. (Tesis de doctorado) Universidad Nacional de Tucumán, Argentina.
- FAO. (2011). *Land Degradation Assessment in Drylands. Methodology and results*. Roma, Italia.
- FAO. (2017). *Carbono Orgánico del Suelo: el potencial oculto*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura. Roma, Italia
- FAO e ITPS. (2015). *Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report*. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Roma, Italia.

- Garrido, A. y Cotler, H. (2010). Degradación de suelos en las cuencas hidrográficas de México. En Cotler Ávalos, H. (Coord.) Las cuencas hidrográficas de México diagnóstico y priorización. (pp. 104-107). México.
- Gauna Ruiz de León, C. (2019). Poblamiento, desarrollo, conservación y conflicto en la costa de Jalisco: una revisión histórica. Pasos: Revista de Turismo y Patrimonio Cultural, 17(1), 193-207.
- Giuliani, G., Mazzeti, P., Santoro, M., Nativi, S., Van Bemmelen, J., Colangeli, G y Lehmann, A. (2020). Knowledge generation using satellite earth observations to support sustainable development goals (SDG): A use case on Land degradation. Int J Appl Earth Obs Geoinformation 88 (2020) 102068.
- INEGI. (2009). Guía para la interpretación de cartografía uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000: Serie III. Aguascalientes, Ags., México. ISBN: 978-607-494-015-2. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/1329/702825231576/702825231576_1.pdf
- INEGI. (2010). Principales resultados por localidad (ITER). Censo de Población y Vivienda 2010. Conjunto de indicadores de población y vivienda a nivel localidad de todo el país, provenientes del Censo de Población y Vivienda 2010.
- INEGI. (2010). "Red hidrográfica, subcuencas hidrográficas de México", escala: 1:50000. Edición: 2. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Aguascalientes, Ags., México. SIATL. http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#app=86ae&4b36-selectedIndex=0&6fa8-selectedIndex=0&6d02-selectedIndex=2
- INEGI. (2014). Conjunto de Datos Vectorial Edafológico, Escala 1:250,000 Serie II (Continuo Nacional). México: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- INEGI. (2017). Guía para la interpretación de cartografía uso de suelo y vegetación. Escala 1:250000: Serie VI. Aguascalientes, Ags., México. INEGI. https://www.inegi.org.mx/contenido/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825092030.pdf
- IUCN 2015. Land Degradation Neutrality: implications and opportunities for conservation, Technical Brief 2nd Edition, Noviembre. 2015. Nairobi: IUCN. p.19.
- Kolb M., Gerritsen, P. R. W., Garduño, G., Lazos Chavero, E., Quijas, S., Balvanera, P., Álvarez, N. y Solís, J. (2018). Land Use and Cover Change Modeling as an Integration Framework: A Mixed Methods Approach for the Southern Coast of Jalisco (Western Mexico). En: Camacho Olmedo *et al.* (eds.), Geomatic Approaches for Modeling Land Change Scenarios, Lecture Notes in Geoinformation and Cartography, 241-268.
- López Cadenas de Llano, F. (1998). Restauración hidrológica forestal de cuencas y control de la erosión. Ingeniería medioambiental. España: TRAGSATEC, Ministerio de Medio Ambiente, Editorial Mundi Prensa, 945 pp.

- López Pérez, J. E. y Cruz Romero, B. (2020). Dinámica forestal y uso de suelo en las cuencas que integran al municipio de Tomatlán, Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 11(58), 48-68.
- López Santos, A. (2016). Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México?. *Terra Latinoamericana*, 34(2), 239-249.
- Michel Canchola, J. E., Cruz Romero, B., Téllez López, J. y Carrillo González, F. M. (2019). Análisis histórico de la deforestación en la costa de Jalisco, México. *Revista DELOS Desarrollo Local Sostenible*, 12(35).
- Pasquarella, V. J., Holden, C. E., Kaufman, L. y Woodcock, C. E. (2016). From imagery to ecology: leveraging time series of all available Landsat observations to map and monitor ecosystem state and dynamics. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. p. n/a-n/a.
- Pettorelli, N., Schulte to Bühne, E., Tulloch, A., Dubois, G., Macinnis-Ng, C., Queríos, A. M., Keith, D. A., Wegmann, M., Schrodt, Stellmes, M., Sonnenschein, R., Geller, G. N., Roy, S., Somers, B., Murray, N., Bland, L., Geijzen-dorffer, I., Kerr, J. T., Broszeit, S., Leitao, P. J., Duncan, C., El Serafy, G., He, K. S., Blanchard, J. L., Lucas, R., Mairota, P., Webb, T. J. y Nicholson E. (2017). Satellite remote sensing of ecosystem functions: opportunities, challenges and way forward. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 4(2), 71-93.
- Ruiz, F. (2019). Assessing the state of sustainable development goals in Mexico using open remote sensing data: Indicator 15.3.1 Proportion of land that is degraded over total land area. (Master's Thesis). Wageningen University and Research Centre, Wageningen, Países Bajos.
- SEMADET. (2018). Programa Estatal para la Acción ante el Cambio Climático. Secretaría de Medio Ambiente y Desarrollo Territorial. Gobierno del Estado de Jalisco. Guadalajara, Jalisco. México. 134 pp.
- SEMARNAT. (2004). Degradación del suelo en la República Mexicana - Escala 1:250 000. <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>
- SEMARNAT. (2010). Atlas Geográfico del Medio Ambiente y Recursos Naturales. Edición 2010.
- SEMARNAT. (2011). Estrategia nacional de manejo sustentable de tierras. Red Mexicana de Cuencas. <https://remexcu.org/documentos/boletines/DS-2018-04-%20Semarnat.pdf>
- SEMARNAT. (2016). Informe de la situación del Medio Ambiente en México. Compendio de Estadísticas Ambientales. Indicadores Clave, de Desempeño Ambiental y de Crecimiento Verde. Edición 2015.
- Sims, N.C., Green, C., Newnham, G. J., England, J. R., Held, A., Wulder, M. A., Herold, M., Cox, S.J.D., Huete, A.R., Kumar, L., Viscarra-Rossel, R.A., Roxburgh S.H y McKenzie, N.J. (2017). Good Practice Guidance: SDG In-

- indicator 15.3.1. Version 1.0. United Nations Convention to Combat Desertification, 1–115. UNCCD. https://www.unccd.int/sites/default/files/relevant-links/2017-10/Good Practice Guidance_SDG Indicator 15.3.1_Version 1.0.pdf
- Sims, Neil C., England, J. R., Newnham, G. J., Alexander, S., Green, C., Mine-lli, S., y Held, A. (2019). Developing good practice guidance for estimating land degradation in the context of the United Nations Sustainable Development Goals. *Environmental Science and Policy*, 92, 349–355. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.10.014>
- United Nations Framework Convention on Climate Change. (2010). Tool for the estimation of change in soil organic carbon stocks due to the implementation of A/R CDM project activities (versión 01.0).
- Viera Mejía, D. A. y Michel Canchola, J. E. (2020). Descripción geográfica de la Costa de Jalisco. En Morales Hernández, J.C. y Cruz Romero, B. (coords.). *Caracterización de la Costa de Jalisco: Relación con la variabilidad climática, cambio de uso de suelo y aspectos socioeconómicos* (pp. 1-23). México. Universidad de Guadalajara. E-Dae (Ed.).

Capítulo VII

Percepción y conocimiento sobre cambio climático de cafecultores en dos regiones de Veracruz, México: bases para la gestión integral de riesgos y la adaptación

Suárez-González, Gabriela ¹, Travieso-Bello, Ana Cecilia ²

¹ Maestra en Economía Ambiental y Ecológica. Doctorante en Ciencias Administrativas y Gestión para el Desarrollo, Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Veracruzana, Veracruz, México.
Dirección electrónica: lebasi_hs@hotmail.com

² Doctora en Ciencias. Profesora-Investigadora del Programa de Geografía, de la Facultad de Economía, Universidad Veracruzana, Veracruz, México.

Resumen

La frecuencia e intensidad de los fenómenos hidrometeorológicos ha aumentado principalmente a causa del cambio climático. Los impactos de estos afectan los sistemas productivos, entre los cuales destaca el sistema del café por su alta dependencia a las variables climáticas. En este contexto, el trabajo analiza la percepción y los conocimientos sobre cambio climático entre productores de café, en dos regiones de la zona centro del estado de Veracruz, México y su disposición para implementar medidas de adaptación que les permitan reducir su vulnerabilidad actual y futura. Para ello se realizó una encuesta, donde se aplicaron 64 cuestionarios de forma directa. Se encontró que los productores de ambas regiones han observado cambios en el clima, principalmente en la temperatura y la precipitación. La mayoría de los encuestados ha escuchado sobre el cambio climático; la información que obtienen proviene principalmente de medios de comunicación como la televisión, la radio y los periódicos. La mayoría mencionó que el tema le preocupa mucho y que está muy dispuesta a introducir cambios para reducir los impactos negativos del cambio climático sobre el cultivo de café. Las principales causas del cambio climático que identifican son la deforestación y la contaminación. Se concluye que el co-

nocimiento de la percepción de los productores sobre el cambio climático y su disposición para adoptar medidas de adaptación son de suma importancia para la gestión integral de riesgos por fenómenos hidrometeorológicos y el diseño de procesos de adaptación, que les permita reducir su vulnerabilidad actual y futura.

Palabras clave: *cambio climático, fenómenos hidrometeorológicos, percepción, medidas de adaptación, vulnerabilidad.*

Introducción

El cambio climático ha provocado una gran cantidad de alteraciones atmosféricas, especialmente en el ciclo hidrológico. Una manifestación de estas alteraciones es el aumento en la intensidad y frecuencia de fenómenos como sequías, precipitaciones, inundaciones y humedad, principalmente (Sánchez *et al.*, 2011).

Los impactos de los fenómenos extremos asociados al clima exhiben una importante vulnerabilidad y exposición de los sistemas tanto naturales como humanos a la variabilidad climática (IPCC, 2014), detonando desastres que provocan pérdidas humanas, materiales y en los ecosistemas (UNICEF y INECC, 2019). Los desastres son un indicador de la vulnerabilidad a condiciones extremas del clima. Por ello, se requieren esfuerzos para la adaptación a estos eventos, que contribuyan a la reducción de los daños en el corto y largo plazo (Magaña, 2008).

La agricultura es uno de los sistemas productivos más afectados por el cambio climático, pues este fenómeno impacta negativamente la producción, los medios de vida de la población que depende de esta actividad, así como la seguridad alimentaria y nutricional de las personas (FAO, 2018). De manera particular, el cultivo de café requiere de condiciones ambientales (luz, temperatura, precipitación y humedad) adecuadas para su desarrollo, por tanto, el incremento de la temperatura, el cambio en los patrones de precipitación y el aumento de la intensidad y frecuencia de eventos meteorológicos extremos afectarán su capacidad productiva (CEPAL y CAC/SICA, 2014). Se espera que los impactos del cambio climático sobre el cultivo de café sean negativos, debido a la pérdida de aptitud climática. La región de Mesoamérica enfrentará en promedio una disminución del área apta para la producción de café, con mayores pérdidas para México, correspondientes al 29% (Ovalle *et al.*, 2015).

En México la superficie destinada al cultivo del café alcanzó 710 mil hectáreas, distribuida en 480 municipios y 14 entidades federativas. Destacan los estados de Chiapas, Veracruz y Oaxaca, que concentran 74.8% de la superficie sembrada y 81.5% de la producción nacional. Esta actividad productiva emplea a más de 500,000 productores (SIAP, 2019). El café es uno de los principales productos agrícolas que se comercializa en los mercados internacionales (ICO, 2020), por

tanto, la disminución de su producción podría tener un impacto negativo mayor en la economía, en comparación con otros productos.

La percepción del cambio climático es un prerequisite para la adaptación (Maddison, 2007). Soares *et al.* (2018) mencionan que la aceptación de políticas de adaptación por parte de los actores locales dependerá de sus percepciones sobre la naturaleza, gravedad y posibles consecuencias del problema. Forero *et al.* (2014) también reconocen la importancia de conocer las opiniones, intereses, demandas y necesidades de la población para una mayor comprensión de los impactos del cambio climático. Por último, Ahumada y García (2018) señalan que las investigaciones sobre cambio climático requieren el estudio de la percepción de la población involucrada, en relación al conocimiento, comprensión del problema y disposición, para implementar medidas de adaptación.

Por otra parte, la gestión integral de riesgos, definida como “el conjunto de acciones encaminadas a la identificación, análisis, evaluación, control y reducción de los riesgos” (CD, 2018) requiere la percepción de los productores para contribuir a la identificación de los riesgos, su prevención y mitigación.

Con base en los argumentos previos, el objetivo del trabajo es analizar la percepción y los conocimientos sobre cambio climático entre productores de café, en dos regiones de la zona centro del estado de Veracruz, México y su disposición para implementar medidas de adaptación, que les permitan reducir su vulnerabilidad actual y futura.

Materiales y métodos

El estudio realizado es de carácter exploratorio, se llevó a cabo con productores de café socios de organizaciones cafetaleras de dos regiones de la zona centro del estado de Veracruz. La investigación fue realizada en la región Coatepec, con la Unión de Productores, Beneficiadores y Exportadores de la Región de Coatepec, S.S.S. de R.L. y en la región Huatusco, Vinculación y desarrollo agroecológico en café, A.C. (Vida, A.C.).

Las regiones de Coatepec y Huatusco se localizan en la zona centro del estado de Veracruz, en un rango de altitud de 1,000 a 1,350 msnm. La temperatura media anual oscila entre 12 y 19 °C, mientras que la precipitación total anual varía entre 1,350 y 2,200 mm (Manson *et al.*, 2008).

La encuesta se aplicó de manera directa, mediante un cuestionario organizado en tres secciones: 1) Datos generales, 2) Percepción de cambios en el clima y 3) Conocimiento sobre cambio climático.

En la primera sección se indagó el sexo, la edad y la escolaridad de los encuestados. En la segunda, se les preguntó si han percibido cambios en el clima, especificando los tipos de cambios observados en las variables temperatura y pre-

precipitación, su antigüedad y si los consideran positivos o negativos. En la tercera sección se interrogó a los cafeticultores sobre si han escuchado hablar sobre el cambio climático, sus causas y los medios a través de los cuales obtienen esta información. Por último, se exploró si el cambio climático es un tema que les preocupa, su disposición a implementar medidas de adaptación y los factores que limitarían dicha disposición.

En total se aplicaron 64 cuestionarios (20 a socios de la UPByE y 44 a socios de Vida, A.C.). Los datos obtenidos se analizaron con el programa SPSS y se obtuvieron estadísticas descriptivas.

Resultados y discusión

Los productores encuestados en la UPByE se encuentran en el rango de edad de 46 a 87 años, con un promedio de 61 años. Existe una mayoría de hombres (65%) y el grado promedio de escolaridad es 6.7 años (primaria concluida). En Vida, A.C. el rango de edad de los productores es de 26 a 80 años y la edad promedio 52.7 años. También dominan los hombres (54.5%) y la escolaridad promedio es de 7.2 años (primer grado de secundaria).

Percepción sobre cambios en el clima

El total de los encuestados de ambas organizaciones indicó que el clima ha venido cambiando en los últimos 15 años. Referente a la temperatura, 55.2% de los encuestados de la UPByE y 45.7% de Vida, A.C. perciben un aumento; cabe señalar que 31.0% de la UPByE y 35.7% en Vida, A. C. mencionan cambios bruscos en esta variable. En cuanto a la precipitación, 70.6% en la UPByE y 56.8% en Vida, A.C. manifiestan que se ha atrasado (tabla 1). La percepción de los productores coincide con los cambios en la temperatura y la precipitación, reportados para México en los últimos 50 años (SEMARNAT-INECC, 2012).

Tabla 1. Cambios percibidos en la temperatura y la precipitación por los cafeticultores

Cambios percibidos en la temperatura y la precipitación	UPByE	Vida, A.C.
	Frecuencia relativa (%)	Frecuencia relativa (%)
Temperatura		
Más calor	55.2	45.7
Más frío	13.8	18.6
Cambios bruscos	31.0	35.7

Precipitación		
Se ha atrasado	70.6	56.8
Se ha adelantado	17.6	21.6
Se ha atrasado y adelantado	11.8	21.6

Fuente: elaboración propia a partir de los datos de la encuesta.

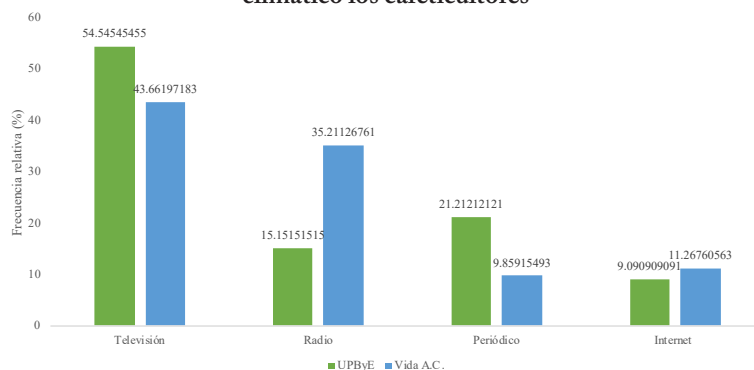
La mayoría de los cafeticultores (70% de la UPByE y 79.6% de Vida, A.C.) perciben que los cambios en la temperatura y la precipitación son negativos para el cultivo de café, porque han provocado la proliferación de la roya del café (*Hemileia vastatrix*) y la disminución de la producción. Cabe mencionar que esta enfermedad impacta económicamente a los productores, pues afecta la cantidad y la calidad de la producción. Además, demanda la implementación de medidas costosas de control sanitario en los cafetales (SAGARPA y SENASICA, 2016).

Además, los productores mencionaron que el aumento de temperatura provoca el marchitamiento las plantas de café. La ausencia de lluvias afecta la floración, mientras que el exceso de lluvias no permite el corte del grano.

Conocimiento sobre cambio climático

El total de los encuestados de la UPByE y 86.4% de Vida, A.C. han escuchado sobre el cambio climático. Los principales medios de comunicación de los que reciben información son la televisión, la radio y el periódico; un reducido porcentaje de productores mencionó el internet (figura 1).

Figura 1. Medios de comunicación de los que reciben información sobre cambio climático los cafeticultores

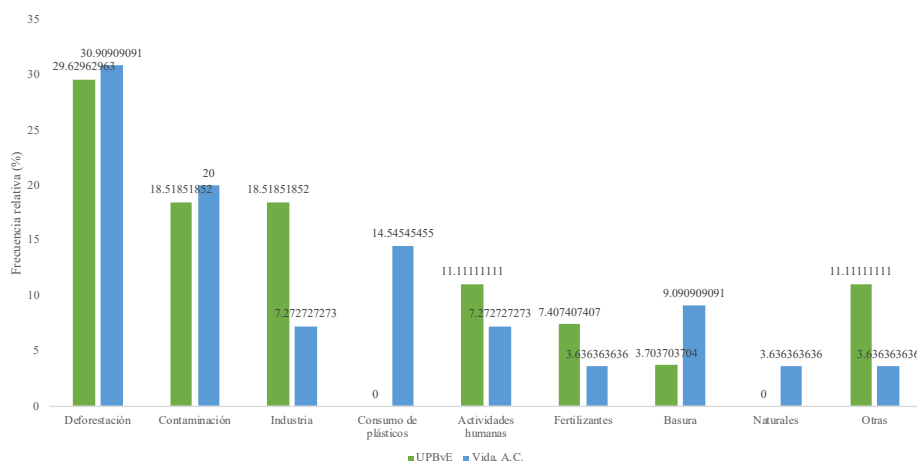


Fuente: elaboración propia, con datos de la encuesta.

Otra fuente importante de información para los productores son las propias organizaciones. En el caso de Vida, A.C. 80% de los socios encuestados indicó que su organización les brinda información sobre cambio climático. Además, mencionaron que es un tema recurrente en las reuniones del grupo. En contraste, solo 30% de los encuestados de la UPByE mencionó que reciben información sobre el tema por esta vía.

La mayoría de los encuestados señalaron a las actividades antropogénicas como causa del cambio climático; sólo 3.6% de los socios de Vida, A.C. lo consideraron de origen natural. En ambas organizaciones mencionaron a la deforestación y la contaminación como las causantes principales de este fenómeno (figura 2). Esto coincide con los reportes del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, que consideran ambos orígenes, pero dan un mayor peso a las actividades humanas (IPCC, 2013).

Figura 2. Causas del cambio climático percibidas por los cafeticultores



Fuente: elaboración propia, con datos de la encuesta.

Un alto porcentaje de los encuestados (85% en la UPByE y 76.3% en Vida, A.C.) señaló que el tema de cambio climático le preocupa mucho porque lo percibe como una amenaza para el cultivo del café. Por otro lado, existe mucha disposición por parte de los cafeticultores encuestados (75% de la UPByE y 81.6% de Vida, A.C.) para implementar medidas que les permitan reducir los impactos negativos del cambio climático en el cultivo de café y así reducir su vulnerabilidad actual y futura (tabla 2). Los principales motivos de su disposición son la conservación y

el mejoramiento de las condiciones actuales de los cafetales y la preocupación por las futuras generaciones. Incluso los productores de Vida, A.C. actualmente realizan acciones que contribuyen al cuidado del ambiente, entre las cuales destacan la reducción del consumo de plástico, la separación de residuos sólidos y el manejo agroecológico del cafetal.

Lo anterior representa una gran oportunidad, pues sólo cuando se involucra a las partes interesadas en el proceso de adaptación se puede esperar que las medidas sean aceptadas y que los actores se apropien de ellas, evaluando sus beneficios (Magaña, 2008).

Además, la percepción de los productores sobre los impactos que ocasionan los cambios de la temperatura y la precipitación en la producción de café, unido a su disposición para implementar medidas para disminuir la vulnerabilidad, contribuyen a la gestión integral del riesgo, ya que inciden directamente en las etapas de identificación, prevención y reducción de riesgos (CD, 2018).

Tabla 2. Preocupación de los cafeticultores por el cambio climático y su disposición a implementar medidas de adaptación

	Preocupación		Disposición	
	Frecuencia relativa (%)		Frecuencia relativa (%)	
Categorías	UPByE	Vida, A. C	UPByE	Vida, A.C.
Poco	10	2.6	20	2.6
Más o menos	5	21.1	5	15.8
Mucho	85	76.3	75	81.6

Fuente: elaboración propia, con datos de la encuesta.

Por otro lado, indican que las principales limitaciones para implementar medidas de adaptación al cambio climático son la escasez de recursos económicos y de tiempo. Además, algunos de los encuestados de la UPByE señalan la enfermedad como otra limitante, debido a la edad avanzada de los productores y a la falta de relevo generacional. Finalmente, los productores de ambas organizaciones demandan mayor apoyo gubernamental para el financiamiento de medidas que les permitan adaptarse al cambio climático.

Conclusiones

Los cafeticultores encuestados de la UPByE de la región de Coatepec y de Vida, A.C. de la región de Huatusco consideran que el clima ha venido cambiando en

los últimos 15 años, destacan el aumento de la temperatura y el retraso de las precipitaciones. La mayoría tiene conocimientos sobre el cambio climático e identifica a las actividades antropogénicas como la causa fundamental de este fenómeno. Ellos refieren que esta información la han adquirido por diversos medios, entre los que destacan la televisión, la radio, los periódicos y su propia organización.

Además, les preocupa mucho el cambio climático porque afecta sus medios de vida. Por ello, están dispuestos a implementar medidas que reduzcan el impacto negativo del cambio climático en el cultivo de café. No obstante, se debe considerar en el diseño de estrategias de adaptación la falta de recursos y de tiempo de los productores, ya que estos factores se identificaron como posibles barreras.

El conocimiento de la percepción de los productores sobre el cambio climático y su impacto en la producción de café, así como su disposición a adoptar medidas de adaptación, son de suma importancia para la gestión integral de riesgos por fenómenos hidrometeorológicos y el diseño de procesos de adaptación, que les permitan reducir su vulnerabilidad actual y futura.

Agradecimientos

Las autoras agradecen a la Unión de Productores, Beneficiadores y Exportadores de la Región de Coatepec, S.S.S. de R.L. y a Vinculación y desarrollo agroecológico en café, A.C. por su participación en el presente estudio; al Programa de Estudios de Cambio Climático de la Universidad Veracruzana por el financiamiento para realizar el trabajo de campo. Además, la primera autora agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) el apoyo otorgado dentro de la Convocatoria Estancias Posdoctorales Vinculadas al Fortalecimiento de la Calidad del Posgrado Nacional 2019 (2).

Referencias bibliográficas

- Ahumada, R. y García, P.A. (2018). Conocimiento y percepción acerca del cambio climático en comunidades costeras del municipio de Guasave, Sinaloa, México. *Investigación y Ciencia de la Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 26(75): 38-45.
- CD (Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión). (2018). Ley General de Protección Civil. Diario Oficial de la Federación del 6 de junio de 2012. Última reforma publicada DOF 19-01-2018.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) y CAC/SICA (Consejo Agropecuario Centroamericano del Sistema de la Integración Centroamericano). (2014). *Impactos potenciales del cambio climático sobre el café en Centroamérica*. LC/MEX/L.1169, México: NU (Naciones Unidas).
- FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2018). *Cambio climático y seguridad alimentaria y nutricional: América Latina y el Caribe (gestión del riesgo de desastres en el sector agrícola)*. Santiago, Chile: FAO.
- Forero, E.L., Hernández, Y.T. y Zafra, C.A. 2014. Percepción latinoamericana de cambio climático: metodologías, herramientas y estrategias de adaptación en comunidades locales. Una revisión. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 17(1): 73-85.
- ICO (International Coffee Organization). (2020). Historia del Café. Recuperado de: http://www.ico.org/ES/coffee_storyc.asp. (Consultado el 10 de febrero del 2020).
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). 2013. Resumen para responsables de políticas. En T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (Eds.), *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Estados Unidos de América: Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York.
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático). (2014). *Cambio Climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Resumen para responsables de políticas*. Suiza: OMM (Organización Meteorológica Mundial).
- Maddison, D. (2007). The perception of and adaptation to climate change in Africa. Policy Researcher Working Paper 4308. The World Bank.
- Magaña, V. (2008). Adaptación a la variabilidad y cambio climático. En P. Aldunce, C. Neri, y C. Szlafsztein (Eds.), *Hacia la evaluación de prácticas de adaptación ante la vulnerabilidad y el cambio climático* (pp. 43-50). Belém: NUMA, UFPA.
- Manson, R., Contreras, A. y López, F. (2008). Estudios de la biodiversidad en cafetales. En R.H. Manson, V. Hernández, O.S. Gallina y K. Meltreter (Eds.),

- Agroecosistemas cafetaleros de Veracruz. Biodiversidad, manejo y conservación* (pp. 1-14). México: INECOL, INE-SEMARNAT.
- Ovalle, O., Läderach, P., Bunn, C., Obersteiner, M. y Schroth, G. (2015). Projected Shifts in *Coffea arabica* Suitability among Major Global Producing Regions Due to Climate Change. *PLoS ONE*, 10(4): e0124155. doi:10.1371/journal.pone.0124155.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación) y SENASICA (Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria). (2016). *Roya del cafeto*. Ficha técnica No. 40. Recuperado de: <http://www.cesaveson.com/files/docs/campanas/vigilancia/fichas2016/ROYAcafeto.pdf>. (Consultado el 25 de febrero de 2020).
- Sánchez, J.M., Serrano, M.E., Sangermán, C.M., Navarro, A., Vera, G.R., Cuevas, J.A. y Macías, J.L. (2011). Eventos hidrometeorológicos extremos y desastres en comunidades rurales y urbanas en Motozintla, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 2 (Núm. Especial 2): 167-181.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales)-INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2012). *Adaptación al cambio climático en México: Visión, elementos y criterios para la toma de decisiones*. México.
- SIAP (Sistema de Información Agroalimentaria y Pesquera). (2019). *Anuario Estadístico de la Producción Agrícola*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/siap>. (Consultado el 14 de octubre de 2019).
- Soares, D., García, A. y Manzano, L.R. (2018). Cambio climático. Percepciones sobre manifestaciones, causas e impactos en el Distrito de Temporal Tecnicado Margaritas-Comitán, Chiapas. *Ciencia Ergo-sum*, 25(1): 1-12.
- UNICEF (Fondo de las Naciones Unidas para la Infancia) y INECC (Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático). (2019). *El cambio climático y mis derechos*. Manual para docentes. México.

Capítulo VIII

Plataforma IXIM para el análisis de multirriesgo agroclimático

*Gabriel Origel-Gutiérrez¹, Oscar Sánchez-Martínez¹, Oscar Rojas¹,
Vicente Torres-Rodríguez², Guillermo Montilla-León²,
Julio N. Martínez-Sánchez², Miguel Blancas-Reza²*

¹ Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), dirección electrónica: gabriel.origel@gmail.com

² Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C.

Resumen

La agricultura es vulnerable a los impactos de la variabilidad climática y el cambio climático por ser dependiente de condiciones atmosféricas, situación que origina afectaciones que pueden amenazar la seguridad alimentaria. Los desastres asociados a eventos hidrometeorológicos extremos pueden afectar los cultivos, reducir la producción agrícola, dañar infraestructuras agroalimentarias, así como afectar bienes e insumos agrícolas. Por lo anterior, y como estrategia para mitigar tales impactos, se promueve el uso de información agroclimática oportuna a través de la vigilancia de cultivos, acción clave para mantener la producción agrícola, ya que permite detectar déficits a corto plazo y coadyuva en el desarrollo rural a largo plazo. Para la vigilancia se utilizan programas de cómputo habilitados en Sistemas de Alerta Temprana Agroalimentarios (SATA). La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) desarrolló la “Plataforma de Análisis Multirriesgo Agroclimático (IXIM)”, un programa computacional para analizar cultivos en riesgo asociado a huracanes, inundaciones, heladas, granizadas y ondas de calor. Esta plataforma fue transferida a la Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) en México para proceder a su implementación operativa. El objetivo de este capítulo es difundir la estructura y operación de IXIM para promover su uso, retroalimentación y posibles mejoras. Entre las principales ventajas de IXIM están: contar con un potente y muy rápido módulo de interpolación de datos de estaciones meteorológicas que funciona con una malla de referencia e incluye técnicas basadas en una co-variable asistente predictora; calcular en forma automática el balance hídrico del suelo agrícola propuesto por la FAO; producir datos

compatibles con Sistemas de Información Geográfica (SIG); generar pronósticos meteorológicos por asimilación de datos; detectar en automático eventos extremos y áreas de afectación por análisis multirriesgo en zonas agrícolas; contar con bases de datos agroclimáticas: valores umbrales críticos por cultivo y etapa de desarrollo, fenología, coeficientes de cultivo, así como cartografía nacional de cultivos básicos (maíz, frijol, trigo y sorgo). Como resultado, IXIM realiza la detección temprana de áreas agrícolas con riesgo de afectación según su sensibilidad y etapa de desarrollo. Finalmente, y debido a que IXIM exporta estadísticas, mapas y variables ráster, se espera que contribuya también al análisis meteorológico convencional en otras aplicaciones.

Introducción

Las afectaciones en el sector agrícola por desastres asociados a eventos hidrometeorológicos extremos pueden llegar a representar un riesgo para la seguridad alimentaria. Las sequías, ondas de calor, inundaciones, huracanes, heladas y granizadas pueden disminuir significativamente la disponibilidad de alimentos al destruir la producción del sector primario, dañar las infraestructuras para el procesamiento de los alimentos, afectar los bienes e insumos requeridos y la capacidad productiva de los agricultores. Como consecuencia, se provoca inestabilidad en los precios de los alimentos, se desestabilizan los mercados, se origina un entorno que afecta a los sistemas de comercialización agrícola, así como al suministro y consumo de alimentos. De igual forma, los eventos hidrometeorológicos extremos reducen los ingresos y obligan a los agricultores a emplear sus ahorros deteriorando los medios de vida, situación que se refleja en una mayor vulnerabilidad para diversas comunidades.

Asimismo, las pautas estacionales de la producción agrícola se relacionan con el ciclo biológico de cada cultivo, por lo que depende de factores climáticos y de las características físicas del medio ambiente como temperatura, exposición a horas luz y disponibilidad de agua para las plantas. Esta complejidad, junto con los desafíos añadidos por el crecimiento de la población, la degradación del medio ambiente y el cambio climático, aumentan las necesidades de información agroclimática en forma oportuna (Rembold *et al.*, 2019). Por esta razón, la vigilancia agrícola y el seguimiento de los cultivos constituyen acciones clave para la producción agrícola y la seguridad alimentaria. Se estima que, en más de cien países, estas actividades se realizan a través de los SATA (Fritz *et al.*, 2019), ya que la vigilancia agrícola permite detectar los déficits a corto plazo en la producción de cultivos asociados con la variabilidad del clima, pero también facilita el desarrollo rural a largo plazo, especialmente en zonas afectadas por alto riesgo de inseguridad alimentaria (Rembold *et al.*, 2019).

Como estrategia global, en 2015 la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en el marco de la Agenda 2030 estableció los Objetivos de Desarrollo

Sostenible (ODS), que constituyen las líneas de acción para acabar con la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo (ONU, 2020).

El segundo objetivo ODS, denominado “Hambre cero” implica una modificación profunda en el sistema agroalimentario mundial que permita alimentar a más de 820 millones de personas que padecen hambre y a la población creciente. Adicionalmente, el décimo tercer objetivo ODS “Acción por el clima” busca abordar la emergencia climática, a través de un conjunto de medidas que permitan salvar vidas y medios de subsistencia. Entre sus metas principales se encuentra el fortalecer la resiliencia y la capacidad de adaptación a los riesgos relacionados con el clima y los desastres naturales en todos los países.

Este contexto orienta a la FAO, como organización de la ONU, a hacer frente a la problemática y alinearse a los ODS. Por ello, realiza un seguimiento de la evolución de eventos hidrometeorológicos extremos y facilita alerta temprana, así como advertencias sobre sus posibles impactos en la agricultura y la seguridad alimentaria. Como antecedentes, la FAO ha colaborado con modelos de cultivos, herramientas de cómputo y algoritmos, destacan entre estos los siguientes:

- Sistema del Índice de Estrés Agrícola (ASIS), programa computacional dedicado al monitoreo del estrés y la sequía agrícolas a partir de imágenes satelitales a nivel global (FAO, 2016; Van Hoolst *et al.*, 2016) y con versión especial para ciertos países como México, en los que se ha mejorado la cartografía de los cultivos y la información fenológica.
- AgroMetShell (AMS), programa informático elaborado para la previsión del rendimiento de los cultivos (Hoefsloot, 2006).
- Algoritmo *Satellite Enhanced Data Interpolation* (SEDI), el cual realiza interpolación asistida a partir de la alta correlación de una variable ráster conocida, con otra de menor cantidad, de datos medidos para mejorar la distribución espacial de los datos estimados (Hoefsloot, s/f).
- Sistema de Modelos para evaluar los Impactos Agrícolas ante el Cambio Climático (MOSAICC), sistema de modelización basado en la web que permite evaluar los efectos del cambio climático, integrar la información científica en el diseño de los proyectos de desarrollo agrícola y adoptar decisiones económicas, así como elaborar políticas públicas (FAO, 2015).

El desarrollo de la “Plataforma de Análisis Multirriesgo Agroclimático IXIM” constituye un producto realizado en el marco del proyecto UTF/MEX/142, titulado: “Información Agro-climatológica y Certificación de Almacenamiento”, firmado por la FAO y el gobierno de México a través de la SADER. Entre los

propósitos de este proyecto se incluye acompañamiento técnico y transferencia geo-tecnológica para el monitoreo agroclimático, en particular para la implementación de un SATA a través de herramientas computacionales que coadyuven en la toma de decisiones en materia de seguridad alimentaria.

Para la programación de IXIM, la FAO definió las especificaciones técnicas y convocó a una licitación, en la que resultó favorecida la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo (ANIDE), asociación civil de investigación científica aplicada que cuenta con certificación ISO 9001:2008 y está incluida en el Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas (RENIE-CyT) del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

Durante el desarrollo computacional se acordó utilizar para la nueva Plataforma de Análisis de Multirriesgo Agro-Climático el término *IXIM*, que significa maíz en diferentes lenguas del sureste de México, entre ellas chontal, tojolabal, tzotzil, lacandón y maya. Lo anterior, con el propósito de destacar la diversidad genética del principal cultivo de México, así como para honrar la interculturalidad vinculada a las actividades agrícolas.

Objetivo

Difundir la estructura y operación preliminar de la Plataforma de Análisis Multirriesgo Agroclimático IXIM para promover su uso, retroalimentación y posibles mejoras, principalmente en la implementación de un SATA, así como para extender su funcionalidad y aplicaciones en próximas versiones.

Modelo hídrico aplicado

El desarrollo computacional de IXIM se basa en el modelo de la FAO de balance hídrico de suelos para cultivos específicos (CSWB, por sus siglas en inglés), también llamado WABAL (Frere y Popov, 1986) o modelo hídrico de la FAO, el cual es balance hídrico entre el suelo, el agua y los requisitos de la planta, que es utilizado para evaluar el impacto de las condiciones climáticas en los cultivos (Rojas, *et al.*, 2005). Los resultados del modelo hídrico de la FAO se producen cada 10 días, por lo que cubren las diversas etapas de desarrollo de los cultivos y permiten el cálculo de variables, tales como exceso de agua en el suelo, evapotranspiración real y déficit de agua durante las fases fenológicas del cultivo (desarrollo, floración y maduración).

Este modelo es específico para cada cultivo y permite producir variables de mayor relevancia, entre ellas el Índice de Satisfacción de Requerimiento de Agua (WRSI) en el momento del seguimiento y al final del período vegetativo, y la

Evapotranspiración real (ETa). Además, se desempeña especialmente bien en áreas donde el agua es el principal factor limitante en el desarrollo de los cultivos.

Como entrada requiere datos meteorológicos en tiempo *cuasi* real, en especial de la precipitación y de la Evapotranspiración Potencial (PET), obtenidos de estaciones meteorológicas con información disponible no mayor de 10 días de retraso.

La ecuación de balance hídrico para la vegetación es:

$$W_t = W_{t-1} + R - ET_a - (r+i)$$

Donde: W_t es la cantidad de agua almacenada en el suelo en el momento t ; W_{t-1} es la cantidad de agua almacenada en el suelo al final del período anterior ($t-1$); R es la precipitación acumulada durante la decena o el período t ; ET_a es la evapotranspiración real en el tiempo del período t ; r representa las pérdidas de agua debidas a la escorrentía en el tiempo del período t ; i representa las pérdidas de agua debidas a la percolación profunda en el tiempo del período t (Rojas, *et al.*, 2005).

De la ecuación de balance anterior se derivan dos parámetros importantes relacionados con el crecimiento de los cultivos: la ET_a , ya descrita, y el Índice de Satisfacción de Requerimiento de Agua (WRSI). La ET_a tiene que ver fundamentalmente con la energía radiativa solar que influye de forma significativa en el rendimiento de los cultivos. Por su parte, el WRSI se utiliza para evaluar la cantidad de agua recibida por el cultivo durante cualquier momento de la temporada. Habitualmente el WRSI es utilizado para definir el rendimiento de un cultivo de manera cualitativa; es decir, asignando las categorías: bueno, medio y pobre, o en cifras relativas (por ciento de un valor óptimo). Cuando el WRSI es igual a 100, indica que no hay estrés hídrico y que la cosecha es buena, mientras que un valor de WRSI de 50 corresponde a un estrés hídrico de agua severo que provoca un rendimiento deficiente de las cosechas. La estimación de la evapotranspiración real (ET_a) se realiza de acuerdo con el cálculo aplicado en el programa Agromet-Shell (Hoefsloot, 2006).

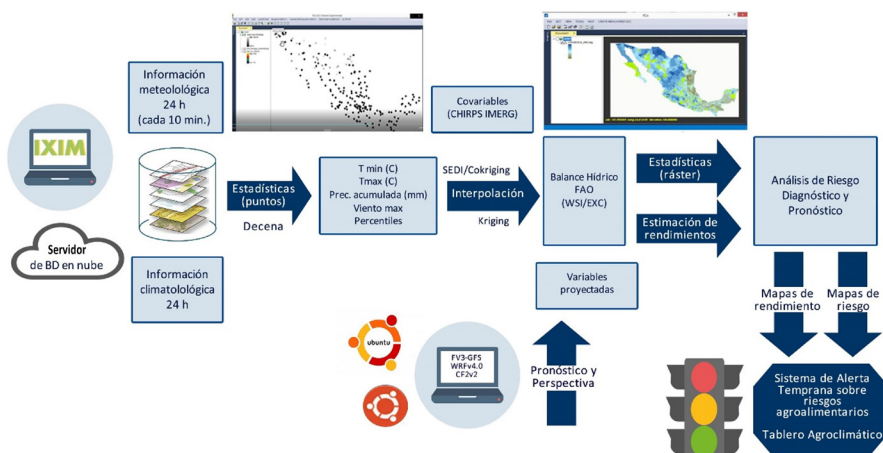
IXIM incluye un modelo para estimar la evapotranspiración de referencia en diferentes resoluciones temporales, siguiendo las pautas sobre la evapotranspiración de cultivos (Allen *et al.*, 1998).

El balance hídrico de la FAO proporciona un indicador de "alerta temprana" de gran utilidad ante la reducción del rendimiento debido al estrés hídrico. Adicionalmente, IXIM evalúa otras variables climáticas durante el tiempo específico del ciclo de cultivo, las cuales podrían afectar el rendimiento y la producción.

Arquitectura computacional y componentes

IXIM es una aplicación computacional, la cual permite analizar datos meteorológicos nacionales que se almacenan en la nube. De igual forma, requiere de un módulo de pronóstico y perspectiva climáticos que se instala en Linux (Ubuntu) (figura 1).

Figura 1. Diagrama de flujo simplificado de la arquitectura computacional del programa IXIM con énfasis en su funcionalidad



Fuente: Origel-Gutiérrez, 2020.

Usuarios y personal

IXIM tiene como usuarios principales a técnicos en agrometeorología, agricultura, y meteorología, que a la vez son proveedores de información agroclimática y de mercados agroalimentarios, así como el personal que colabora en el entorno de un SATA. Otros usuarios potenciales son funcionarios, organismos internacionales y agencias de ayuda humanitaria. El perfil profesional comprende especialistas en Ciencias Atmosféricas, Ciencias de la Tierra, Agronomía, Geografía, Sistemas Computacionales, Informática y computación, Ingeniería y Economía agrícola, entre otras disciplinas.

Hardware

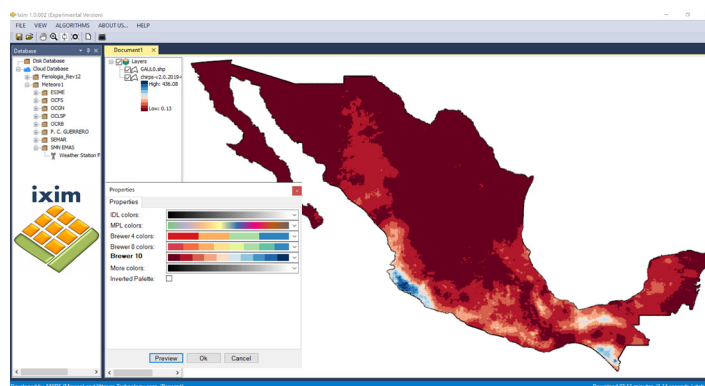
IXIM está programado como sistema para computadoras con *Windows* 10. La capacidad de procesamiento depende del tamaño del país o región. Se recomienda

su instalación en equipos con una configuración mínima de un procesador Intel i7, 16 GB de RAM y 2 TB en disco duro. Es preferible contar con un disco de estado sólido para el arranque. De igual forma, se recomienda una tarjeta de video tipo NVIDIA de 2 GB o superior. También se debe considerar que IXIM requiere conexión a internet de banda ancha para comunicarse con el servidor de bases de datos, que residirá en servicios en la nube o en la red de la institución.

Software

IXIM se desarrolló en C++ y C#, además utiliza librerías como GDAL para su instalación en equipos con sistema operativo *Windows* 10, tiene una interfaz gráfica amigable con diferentes secciones para la interacción, procesamiento y visualización (figura 2).

Figura 2. Interfaz gráfica y logotipo de la Plataforma Multirriesgo Agroclimático IXIM



Fuente: elaboración propia.

Adicionalmente, IXIM requiere de un módulo de pronóstico meteorológico, el cual se instala en Linux (Ubuntu), así como de un servidor de bases de datos en la nube, el cual compila y procesa los datos de las estaciones meteorológicas. Tanto el servidor de bases de datos, como el módulo de pronóstico climático pueden residir en el mismo equipo y contratarse con algún proveedor de servicios en la nube.

Datos espaciales

IXIM simplifica la complejidad del territorio y sus datos (agrícolas, geográficos y meteorológicos) en un modelo espacial ráster, una estructura matricial a la que se

asocia un valor para cada celda, el cual puede ser continuo o discreto, de acuerdo con el tipo de variable. Se utilizan archivos binarios IMG acompañados con archivos ASCII (HDR), que corresponden a los encabezados utilizados en el sistema ENVI. La base de datos requerida se resume en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos de entrada para IXIM*

Clave	Dato	Descripción	Fuente	Formato
MCG	Estaciones meteorológicas automáticas	Base de datos con las variables medidas.	PAIS	XLS
GMX	Malla nacional (~1 km ²)	Polígonos de celdas regulares equidistantes a 0.0089285714 grados (~1 km) en coordenadas geográficas. Uso: estandarizar todos los archivos para referirlos a esta malla nacional.	FAO	SHP
COU/ STA/ MUN	Límites administrativos: país, estados, municipios	Polígonos vectoriales y máscara ráster de límites: país, estados y municipios.	PAIS	SHP e IMG+HDR
MSK	Máscaras ráster para cada cultivo y para cada campaña agrícola	Máscaras ráster de cobertura por cultivo y ciclo. El umbral mínimo de superficie por pixel es de 10% del pixel con cobertura agrícola.	PAIS	IMG+HDR a partir polígono ESRI SHP
WHC	Capacidad de almacenamiento de agua**	Ráster de valores de capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para disponibilidad de las plantas.	PAIS / GLOBAL	GeoTIFF / IMG + HDR
MAC	Fenología Calendario agrícola municipal por ciclo	Tabla con las fechas de siembra y cosecha por cultivo desagregadas a nivel municipal para cada cultivo.	PAIS	CSV
THR	Valores umbrales por fenología del cultivo	Tabla con valores umbrales de acuerdo con la fenología de cada cultivo, información que puede editarse y adaptarse por el usuario.	FAO / PAIS	CSV

*Fuente: elaboración propia a partir de Origel-Gutiérrez 2020. / ** Se recomienda generar esta capa de información por medio de una metodología basada en datos de textura de perfiles de suelos (Torres y Montilla, 2020; Klocke y Hergert, 1990).

Normas geoespaciales

IXIM es una herramienta de la FAO, por lo que se espera implementarla en diversos países, trabaja a partir de una base de datos espaciales ráster con coordenadas geográficas y *datum* WGS84. La resolución espacial es 0.0089 grados decimales, distancia que es variable en función de la latitud y fue establecida para ser consistente con la resolución y malla de datos del sistema ASIS (FAO, 2016; Van Hoolst, 2016), plataforma ya implementada en los SATA de varios países, por lo que ambos son complementarios.

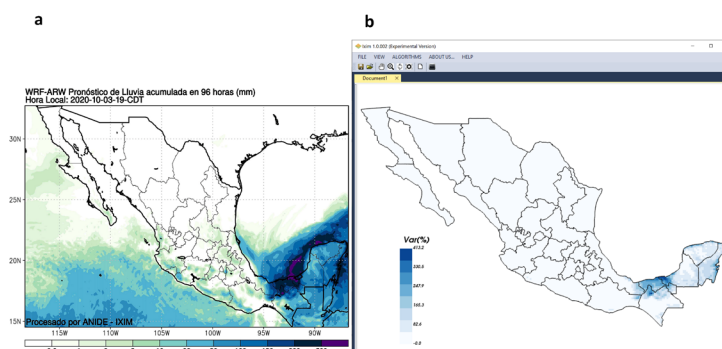
Funcionalidad

La versión 1 de IXIM tiene las siguientes funciones: importación de datos de estaciones meteorológicas automáticas (EMAS) en el formato XLS, o equivalente, con misma estructura para su integración en una base de datos instalada en servicios en nube; lectura directa de variables asistentes en formato ráster (IMG+hdr y GeoTIFF); integración de tablas de fenología (CVS); exportación de estadísticas (CVS); interpolación a una malla ráster de referencia por algoritmos kriging, cokriging y SEDI (Hoefsloot, 2016); cálculo de la correlación estadística entre la variable a estimar y la predictora; enmascaramiento automático de la interpolación según las máscaras de cultivos por ciclo agrícola; cálculo ráster del modelo de balance hídrico de la FAO (Popov y Frere, 1986; Rojas *et al.*, 2005), análisis de multirriesgo hidrometeorológico por eventos extremos; edición de valores umbrales de riesgo para las diferentes variables; pronóstico y perspectiva meteorológica; exportación de reportes en tablas CSV por unidad administrativa; elaboración de mapas; así como exportación de variables ráster (GEOTIFF).

La generación de pronósticos a corto plazo se realiza en un módulo específico en Ubuntu, el cual se ejecuta automáticamente en lenguaje *Bourne-again shell* (*bash*). Este análisis permite evaluar el riesgo por ocurrencia de eventos hidrometeorológicos a 24, 48, 72 y 96 horas, por cultivo y etapas fenológicas. Este pronóstico se obtiene a partir de modelos numéricos del tiempo meteorológico, los datos de entrada se generan en el sistema FV3-GFS (<https://www.gfdl.noaa.gov/fv3/>), un modelo que ofrece salidas de pronóstico a nivel global con resolución espacial de 27.5 km y periodicidad de hasta cuatro veces al día. Posteriormente, se ejecuta un *downscaling* con el modelo WRFV4.0 para obtener archivos de 16 km de resolución, los cuales son remuestreados con GDAL por el método del vecino más cercano a 1 km para ser compatibles con la malla de referencia nacional. En la configuración de IXIM el análisis concatenado de pronóstico a corto plazo se realiza automáticamente a las 00:00 y 12:00 horas zulú. Las varia-

bles utilizadas son precipitación acumulada (figuras 3 y 4), temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio a 2 metros, velocidad y dirección del viento (10 m), así como nieve y hielo.

Figura 3. Salida cartográfica del módulo de pronóstico del tiempo (a) y visualización en la interfaz de IXIM (b). Ambas imágenes muestran el pronóstico a 96 horas de la precipitación en mm. El análisis fue realizado el 30 de septiembre de 2020, adelantando información meteorológica sobre las altas precipitaciones presentadas el 3 de octubre en Tabasco y Chiapas



Fuente: elaboración propia con datos procesados por ANIDE.

Figura 4. Nota periodística de alerta sobre inundaciones en Tabasco y Chiapas, asociadas a lluvias del frente frío 4, la tormenta tropical “Gamma” y el desfogue de Presa Peñitas en el alto Grijalva, situación que provoca afectaciones en rancherías, zonas pobladas y campos de cultivo



Fuente: INFOBAE (www.infobae.com).

Por otra parte, la perspectiva climática (subestacional) en IXIM corresponde a períodos de decenas para 10, 20 y 30 días. El modelo CFSv2 (*Climate Forecast System V2*) se utiliza para obtener estas perspectivas para las variables consideradas en el algoritmo de multi-riesgo. Este modelo cuenta con datos disponibles a nivel global con una ventana temporal de hasta cuatro semanas.

Consideraciones finales y trabajo futuro

La plataforma IXIM se conceptualizó para contribuir al análisis de multirriesgo para la producción agrícola, al modelar y detectar, de manera temprana, áreas de cultivo con potencial de afectación por eventos hidrometeorológicos extremos. Por lo anterior, IXIM puede contribuir también en la toma de decisiones sobre seguridad alimentaria, en la planificación del mercado y en las actividades de comercialización, así como en aspectos relacionados con el almacenamiento de granos básicos.

La novedad principal de IXIM es su versatilidad en la integración de diversas herramientas en un sólo sistema que comprende el ingreso de los datos de estaciones meteorológicas, su interpolación posterior, el cálculo del balance hídrico de la FAO, la lectura y escritura de datos compatibles con diversos sistemas como los SIG; la generación de pronósticos meteorológicos; el análisis multirriesgo en zonas agrícolas, así como la generación de mapas de riesgo de afectación por cultivo y tipo de evento.

Como trabajo futuro para próximas versiones se propone integrar más herramientas dentro de IXIM. En particular para las siguientes funciones:

- Integración de un módulo para definir o cambiar fácilmente el área de estudio y adaptarlo a cualquier territorio
- Ingreso sistematizado de bases de datos históricas sobre estaciones automáticas
- Control de calidad para la depuración de datos
- Análisis retrospectivo para la detección de eventos extremos conocidos
- Compatibilidad con diversas redes de estaciones automáticas
- Integración de diversas estaciones por variable para incrementar el volumen de datos de entrada y mejorar la calidad de interpolación
- Módulo que facilite la integración de diferentes cultivos
- Visualización de atributos de archivos vector
- Interpolación con algoritmos que integren inteligencia artificial que permita mejor ajuste y menor error
- Análisis de datos meteorológicos alternos como variables de entrada, por ejemplo, imágenes derivadas de sensores remotos o de modelos geofísicos que resuelvan ecuaciones complejas, por asimilación de datos a mayor resolución u otros métodos, que permitan funcionar como estaciones virtuales.

- Integración del módulo *Phytosanitary Risk* que incorpore el modelamiento del riesgo de enfermedades y plagas.

Agradecimientos

El patrocinio para el desarrollo de IXIM se realizó en el marco del proyecto UTF/MEX/142 FAO-SADER, se agradece a ambas instituciones el apoyo, financiamiento y facilidades brindadas, así como la autorización para publicar este texto, particularmente a la Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios (ASERCA) y al Centro de Información de Mercados Agroalimentarios (CIMA) (<https://www.cima.aserca.gob.mx>). Asimismo, el acceso de los datos de las estaciones meteorológicas automáticas fue proveído por el Servicio Meteorológico Nacional; la información geográfica y edafológica fue proporcionada por el Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática; mientras que la información cartográfica de superficie cultivada fue facilitada por el Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. Finalmente, la Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos y el CONACYT apoyaron la edición de este capítulo y la presentación de IXIM en el marco de la Octava Reunión Nacional de REDESClim 2020.

Referencias bibliográficas

- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-*FAO Irrigation and drainage paper 56*. FAO, Rome, 300 (9), D05109.
- FAO (2015). *MOSAICC: A modelling system for the assessment of agricultural impacts of climate change*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome.
- FAO (2016). *Protocolo para el Proceso de Calibración y Adaptación Nacional de la Herramienta ASIS-País*. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, (SLM/NRC), Panamá.
- Frere, M., & Popov, G. (1986). *Early agrometeorological crop yield assessment. FAO plant production and protection paper*, 73, 144. FAO.
- Fritz, S., See, L., Bayas, J. C. L., Waldner, F., Jacques, D., Becker-Reshef, I., ... & Rembold, F. (2019). A comparison of global agricultural monitoring systems and current gaps. *Agricultural systems*, 168, 258-272.
- Hoefsloot, P. (2006). *AgrometShell CM box user guide*. Food and Agriculture Organization of the United Nations / The European Union / Southern African Development Community. (http://www.hoefsloot.com/wiki/index.php?title=Main_Page)
- Hoefsloot, P. (s/f). *The SEDI interpolation method*. Disponible en: <http://docplayer.net/32291116-The-sedi-interpolation-method-how-does-it-work.html>
- Klocke, N. L., y Hergert, G. W. (1990). G90-964 How Soil Holds Water. *Historical Materials from University of Nebraska-Lincoln Extension*, 725.
- ONU. (2020). Objetivos de Desarrollo Sostenible. Organización de las Naciones Unidas. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Origel-Gutiérrez, 2020. *Nota técnica: Plataforma de Análisis Multirriesgo Agroclimático IXIM*. Food and Agriculture Organization of the United Nations. México (Informe interno inédito).
- Rembold, F., Meroni, M., Urbano, F., Csak, G., Kerdiles, H., Perez-Hoyos, A., ... & Negre, T. (2019). ASAP: A new global early warning system to detect anomaly hot spots of agricultural production for food security analysis. *Agricultural systems*, 168, 247-257.
- Rojas, O., Rembold, F., Royer, A., & Negre, T. (2005). Real-time agrometeorological crop yield monitoring in Eastern Africa. *Agronomy for Sustainable Development*, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA. 25 (1), pp.63-77. hal-00886252
- Torres-Rodríguez, V. y Montilla-León, G. (2020). *Plataforma de Análisis Climático Multirriesgo en México: Plataforma IXIM (Informe final)*. Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. / Food and Agriculture Organization of the United Nations. México.

Van Hoolst, R., Eerens, H., Haesen, D., Royer, A., Bydekerke, L., Rojas, O., ... & Racionzer, P. (2016). FAO's AVHRR-based Agricultural Stress Index System (ASIS) for global drought monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 37(2), 418-439.

Capítulo IX

Variabilidad climática de las precipitaciones extremas en el Estado de Jalisco para el período 1981-2018

*Ernesto Villate García*¹, *Julio César Morales*², *Omar García Concepción*³,
*María de Lourdes Romo Aguilar*⁴, *Alejandro Ibrahim Corbea Pérez*⁵

¹ Estudiante del Doctorado en Geografía y Ordenación Territorial del CUCSH,
UDG; dirección electrónica: ernestovg1991@gmail.com

² Profesor investigador, Centro Universitario de la Costa, UDG.

³ Profesor investigador, Instituto de Astronomía y Meteorología, CUCEI, UDG.

⁴ Profesora Investigadora, del Departamento de Estudios Urbanos
y del Medio Ambiente, El Colef.

⁵ Estudiante del Doctorado en Biogeociencias, Universidad de Oviedo, España.

Resumen

Las lluvias extremas son consideradas un peligro potencial para México y, en específico, para el estado de Jalisco. Este fenómeno provoca afectaciones socioeconómicas para el territorio al ser detonador de eventos de inundación, modificaciones geomorfológicas como deslizamiento de laderas, erosión de suelos, entre otros. Con base en esto, el presente trabajo tiene como objetivo principal estudiar la variabilidad climática de las precipitaciones extremas en el estado de Jalisco. Para darle cumplimiento se indaga en la variabilidad espacio-temporal de los períodos de retorno y se realiza un análisis de espectros de frecuencia en busca de una posible señal de El Niño Oscilación del Sur (ENSO por sus siglas en inglés). El período de estudio es de 1981-2018 y la base de datos de acumulados de precipitación se obtiene de la red de estaciones climatológicas convencionales pertenecientes a la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Entre los resultados se tiene que la función de distribución de Gumbel es apropiada para el análisis de períodos de retorno. A su vez, existe un patrón de distribución longitudinal de acumulados máximos anuales, con valores que se incrementan hacia la costa del estado. En cuanto al nexo entre frecuencias, se concluye que el ENSO modula la variabilidad climática de los episodios anuales de lluvia extrema.

Introducción

Los estudios sobre peligros naturales representan una herramienta clave para la gestión del riesgo en cada territorio. En la actualidad, muchas de estas investigaciones cobran matices especiales bajo la influencia del cambio climático: una amenaza ineludible para la biósfera en el planeta, donde una transformación pequeña en las condiciones promedio puede conducir a alteraciones significativas en las estadísticas extremas (Katz y Brown, 1992).

En este marco de calentamiento global, según Kunkel (2003), existe la posibilidad de que un aumento en la temperatura (producto a un efecto invernadero incrementado) sea directamente proporcional a la humedad atmosférica y a la precipitación extrema, intensificando el ciclo hidrológico. Esta conclusión no es totalmente confiable, por la complejidad que reviste el mecanismo de precipitación (el calentamiento pudiera no ser diferencial y tener el efecto contrario), pero sí como un llamado de atención ante esta posible correspondencia.

Por lo tanto, es vital que cada región logre un conocimiento profundo sobre el régimen de precipitación en su zona; en especial aquellos acumulados máximos que pudieran considerarse como extremos, influyentes en las diversas esferas socio-económicas y en la gestión del territorio (Monjo, 2010). Este fenómeno es el origen de eventos peligrosos como inundaciones, deslizamiento de laderas, así como afectaciones de tipo geomorfológico que modifican el espacio geográfico y alteran el medio, conduciendo a pérdidas económicas y humanas.

Además de las categorías recurrentes para catalogar las precipitaciones (granizo, nieve, aguanieve, lluvia, llovizna y chubasco), varios investigadores han utilizado umbrales para identificar casos de lluvia intensa (Charles, 2000; Haylock y Nicholls, 2000; Carvalho *et al.*, 2004; Gutiérrez *et al.*, 2011). Se apoyan en estadígrafos descriptivos como media anual, percentil, promedio estacional, para tomar casos de estudio lo más representativos posible y así llevar a cabo análisis sobre este fenómeno peligroso.

Otra de las cuestiones cardinales dentro de la precipitación extrema es su relación con oscilaciones atmosféricas. En especial, se aborda el nexo con El Niño-Oscilación del Sur (ENSO, por sus siglas en inglés), principal evento de teleconexión en el planeta, con una periodicidad típica en el rango de 2 a 7 años (Trenberth, 1997). Existen vínculos notables que relacionan al ENSO con la variabilidad en la frecuencia de los extremos (Liebmann *et al.*, 2001).

Para México, la precipitación extrema es un peligro potencial debido a su ubicación geográfica en gran parte de la zona tropical. El país recibe el impacto de varios fenómenos productores por excelencia de precipitación, como son los ciclones tropicales, ondas tropicales, sistemas frontales y corrientes en chorro. Asimismo,

hay que tener en cuenta la complejidad orográfica (que favorece los procesos convectivos) con un amplio espectro de formaciones como la Sierra Madre Oriental y Occidental, así como la Faja Volcánica Transmexicana, las cuales modulan el régimen de precipitación nacional (García, 2003).

Sobre la base de estas consideraciones, se han desarrollado diversas investigaciones en la República mexicana, con el fin de indagar en el comportamiento espacial y temporal de la intensidad máxima de precipitación (ej: Maderey, 1980; Campos, 1998; Jáuregui, 2001), utilizando metodologías y técnicas estadísticas como ajustes de valores máximos y métodos de interpolación (ej: Díaz *et al.*, 2011; Sánchez, 2011); así como el impacto del ENSO en dicha variabilidad (ej: Magaña *et al.*, 1998; Méndez *et al.*, 2007; Cerano *et al.*, 2011).

En cuanto a los umbrales para catalogar un episodio de lluvia como extremo, Gutiérrez, *et al.*, (2011) realiza un resumen de algunas propuestas para México. Se menciona a Charles (2000), con tres categorías en dependencia de si los acumulados durante cinco días consecutivos superan el 5, 10 o 15% de la media anual. Otro criterio es el empleado por Haylock y Nicholls (2000), quienes proponen tres índices: el número de eventos por encima de un extremo umbral (frecuencia extrema); la intensidad promedio de precipitaciones de eventos extremos (extrema intensidad), y la proporción de precipitación total de eventos extremos (extrema por ciento). A su vez, destaca a Carvalho *et al.*, (2004) con el concepto de un acumulado diario superior al 16% del promedio estacional total.

Específicamente en el estado de Jalisco, los factores detonadores de precipitación (convectivo, orográfico, frontal) convergen, con el incentivo adicional de tener costas en la cuenca del Pacífico nororiental, la segunda zona de mayor actividad de ciclones tropicales a nivel global. La exposición ante el peligro potencial que representa la lluvia extrema aumenta debido a ser un estado eminentemente agrícola, tener zonas turísticas de relevancia nacional como Puerto Vallarta y poseer una de las regiones más pobladas del país, el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG).

El objetivo central del presente estudio es analizar la variabilidad climática de las precipitaciones extremas en el estado de Jalisco. Para darle cumplimiento, se indagará en los períodos de retorno de lluvias máximas y en la posible influencia de ENSO en la variabilidad interanual de los acumulados extremos.

Zona de estudio

La investigación se centra en el estado de Jalisco, una de las regiones con mayor peso económico y poblacional en el país. El territorio se ubica en la porción centro-occidental de México, entre los 18°15'05" y 20°51'49" norte y los 101°28'15" y

105°43'18" oeste, con un área de 80,137 km². Limita al norte con los estados de Nayarit, Zacatecas y Aguascalientes, con Guanajuato al este, al sur con Colima y Michoacán y al oeste con el océano Pacífico. En cuanto a la orografía, destacan la presencia de la Faja Volcánica Transmexicana, la Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre del Sur, la depresión del Balsas y la Mesa Central (Ramos *et al.*, 2007); con elevaciones de 0-4260 msnm; el máximo corresponde al Nevado de Colima.

De acuerdo con las proyecciones del Consejo Nacional de Población, la población total es de 8,368,602 habitantes a inicios del 2020, siendo el cuarto estado más poblado según el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Jalisco está compuesto por 125 municipios. Destaca el AMG donde se concentra la mayor cantidad de población, con un total de 4,434,878 habitantes. Los principales renglones económicos son el comercio, los servicios inmobiliarios y de alquiler de bienes muebles e intangibles, la construcción, la agricultura y cría de animales, el aprovechamiento forestal, la pesca, la caza y la industria alimentaria (tomado del sitio web: www.gob.mx).

En cuanto al clima, de acuerdo con el Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara, existen dos períodos bien marcados en el año: un período lluvioso que va desde mediados de junio hasta finales de octubre, pudiendo adelantarse en las zonas costeras y sur del estado y atrasarse en la región norte, con el 90% del promedio anual de precipitación, y un período seco en el resto de los meses.

Metodología

En la investigación se abordan dos cuestiones: estimación de los períodos de retorno de lluvias extremas y análisis espectral de las frecuencias asociadas a la variabilidad temporal de las mismas.

Como punto de partida del abordaje metodológico se establece una serie temporal. Se conforma una base de datos con valores diarios de precipitación tomados de la red de estaciones climatológicas convencionales de la CONAGUA. Se abordan las estaciones que se encuentren dentro del estado de Jalisco y aquellas que hagan frontera con el mismo (para optimizar la interpolación de los datos). Del total de dichas estaciones, se seleccionan aquellas que presentan un sesgo inferior al 25% del total de registros en el período 1981-2018, cumpliendo con la norma climatológica. Posteriormente, se establecen series de tiempo para cada estación con los acumulados máximos anuales en 24 horas.

Entre las técnicas recurrentes en los estudios de lluvia extrema se encuentra el cálculo de los períodos de retorno. Son aproximaciones estadístico-frecuentista, donde se teorizan frecuencias a partir de una serie de registros precedentes

(Beguería y Lorente, 1999). En el presente artículo se emplea esta metodología a partir de la base de datos conformada.

La estimación de períodos de retorno implica un ajuste a una distribución de probabilidades determinada. En este caso se trabaja con la función de distribución de Gumbel (Gumbel, 1941), un ajuste de valores máximos recomendado para variables como la precipitación, de amplio uso en el territorio mexicano (Maderey, 1980; Campos, 1998; Sánchez 2011; Gutiérrez, *et al.*, 2011). Esta función se define como la probabilidad de que se produzca un evento de lluvia intensa (ecuación 1) en determinado período de retorno, utilizando una serie amplia de mediciones (38 años en este estudio).

$$P(\varepsilon \leq x) = F(x) = e^{-e^{-d(x-u)}} \quad (1)$$

Donde:

$P(\varepsilon \leq x) \rightarrow$ probabilidad de no excedencia,

$F(x) \rightarrow$ frecuencia.

Los parámetros d y u (ecuaciones 2 y 3 respectivamente) se derivan de las series temporales de cada estación y dependen de la media (m) y de la desviación estándar (σ):

$$u = m - 0.450047 * \sigma \quad (2)$$

$$d = 1/(0.779696 * \sigma) \quad (3)$$

La probabilidad de excedencia se calcula como:

$$P(\varepsilon \geq x) = 1 - F(x) \quad (4)$$

y el período de retorno (T) queda:

$$T = 1/[1 - F(x)] \quad (5)$$

Luego, sustituyendo las ecuaciones 5, 4, 3 y 2 en 1, y despejando x , se obtiene el valor mínimo de precipitación que se espera ocurra, en al menos una ocasión, en el período T (ecuación 6).

$$x = u - \frac{\ln(-\ln(F(x)))}{d} \quad (6)$$

Previamente, para comprobar la efectividad de este método, se realiza una prueba de bondad de ajuste con el coeficiente de determinación R^2 (ecuación 7), considerando el valor de 0.9 como límite para una evaluación satisfactoria.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (F_n(x)_i - F(x)_i)^2}{\sum_{i=1}^n (F_n(x)_i - F_n(x)_i)^2} \quad (7)$$

Donde:

n → número de registros de cada estación,

$F_n(x)_i$ → frecuencia real acumulada,

$\overline{F_n(x)_i}$ → frecuencia real acumulada promedio,

$F(x)_i$ → frecuencia teórica acumulada.

Luego, se calculan los valores estimados para los períodos de retorno de 5, 10, 15 y 20 años (no se evalúan lapsos superiores por la ausencia de practicidad, debido a la realidad cambiante del fenómeno estudiado y a la longitud de la serie de referencia). Seguidamente, se realiza un análisis exploratorio de los datos en busca de un ajuste de parámetros óptimo para la posterior interpolación. Estas pruebas son derivados del complemento *Análisis Geoestadístico* del *software* ArcMap en su versión 10.7.

Con dichos referentes relacionados a la distribución espacial de los datos, se lleva a cabo la interpolación de la precipitación para cada período, utilizando la técnica Kriging. De esta manera se confeccionan mapas de amenaza de lluvias máximas en 24 horas. Por motivos prácticos, solo se muestra el mapa relativo al período de 5 años (Pr5).

En un segundo momento, se seleccionan los eventos de precipitación extrema en el período en cuestión. Como valor crítico se adopta el percentil 95 de cada estación (Roy y Balling, 2004), asumiendo que los acumulados superiores a este indicador relativo son casos fuera de lo normal. De esta manera, queda una serie temporal con total de casos anuales de precipitaciones extremas en cada una de las estaciones.

Luego, para indagar en la posible conexión con el ENSO, a estas series anuales se les realiza un análisis espectral; identificando las frecuencias más energéticas en busca de una relación con la periodicidad típica del ENSO. Este análisis, propuesto por Jenkins y Watts (1969), emplea la Transformada de Fourier (TF), la cual es un algoritmo que transforma una serie del dominio del tiempo al dominio de las

frecuencias y viceversa. Esta técnica descompone en senos y cosenos las diferentes frecuencias que componen una serie, con sus respectivas amplitudes y fases. La ecuación para dicha descomposición (ecuación 8) se implementa en Matlab, con un nivel de confianza del 95%.

$$S_x(\omega) = \int_0^T x(t)e^{-i2\pi\omega t} dt = \int_0^T x(t)\cos(2\pi\omega t)dt - i \int_0^T x(t)\sin(2\pi\omega t)dt = a_x(\omega) - ib_x(\omega), \quad (8)$$

Donde:

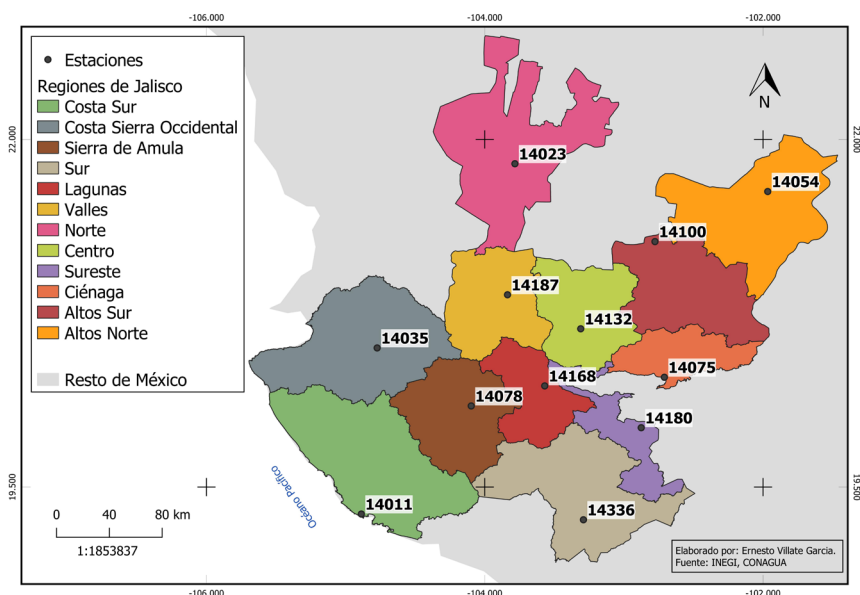
$x(t)$ → serie de tiempo

T → longitud de la serie

ω → frecuencia

Con fines prácticos, en este apartado se emplea solo una estación por región (de acuerdo a la regionalización oficial actualizada al 2014 por INEGI); siendo, así, de utilidad para el trabajo operativo del Servicio Meteorológico Nacional (figura 1). Se seleccionan estaciones equidistantes, manteniendo así la distribución espacial.

Figura 1. Localización de las regiones del estado de Jalisco y sus estaciones representativas seleccionadas



Resultados

En el estado de Jalisco se encuentran ubicadas un total de 123 estaciones climatológicas convencionales en activo, con diferentes fechas de inicio en los registros. Se busca un período de estudio óptimo con la mayor cantidad de registros posibles y mínima afectación a la resolución espacial.

El primer período de estudio considerado es de 1961 a 2018. Sin embargo, como indica la Tabla 1, solo 58 estaciones tienen más del 75% del muestreo en esos años, representando el 47.2% del total. De ahí que se modifica ese lapso de tiempo y se limita a partir del año 1981, exhibiendo así 92 estaciones (74.8%) que cumplen con el criterio para considerarlas en la investigación. De esta manera, se cumple con la norma para estudios climatológicos y a la par se tiene una cobertura espacial aceptable (dentro de la resolución inicial).

Tabla 1. Propuestas de períodos de estudio

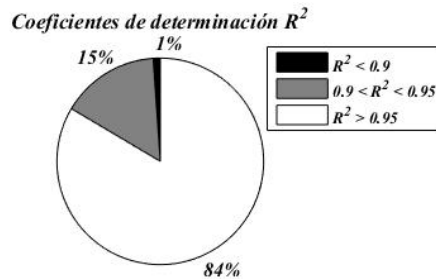
Período	Estaciones disponibles	Datos registrados (%)
1961-2018	58	47.2
1981-2018	92	74.8

Prueba de bondad de ajuste

Antes de aplicar cualquier distribución o función teórica a partir de una serie de datos, se requiere hacer una prueba de bondad de ajuste. Como ya se planteó, para comprobar cuan válida es la distribución de Gumbel como ajuste para los datos de lluvia extrema, se calcula el coeficiente de determinación R^2 para cada estación climática.

La Figura 2 revela que el ajuste toma valores superiores a 0.95 en el 84% de las estaciones, seguido por un 15% en el rango de 0.9 a 0.95. Por ello, las frecuencias teóricas explican un alto grado de la varianza total de las frecuencias reales. Así, se comprueba que el ajuste a la distribución de Gumbel es adecuado para el manejo de lluvias máximas en el estado de Jalisco. Solo una estación (la 14324) tomó valor inferior a 0.9 ($R^2=0.73$), representando apenas el 1% de la muestra total, por lo que no se considera un indicativo fuerte en los resultados de la prueba de bondad.

Figura 2. Gráfico con los porcentajes de estaciones con un R^2 en los rangos de la leyenda

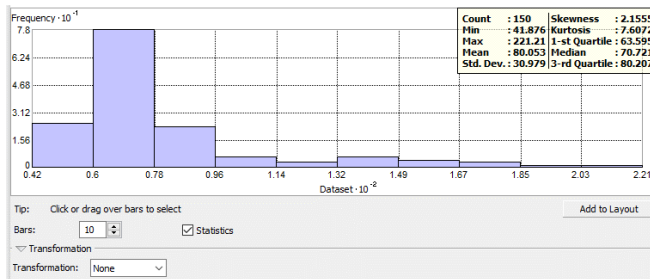


Períodos de retorno

A continuación, se analizan los resultados correspondientes al cálculo de los períodos de retorno de cinco años para cada estación de la zona de estudio (la tabla con todos los valores, incluyendo el resto de los períodos, se puede consultar en el apartado de *Anexos*).

El análisis exploratorio de los datos revela, en primera instancia, el histograma asociado a los acumulados de precipitación (figura 3). Estos oscilan entre 42 mm (estación 14168) y 221 mm (14028), con una media de 80 mm y una desviación estándar de 31 mm. La mayor parte de los valores son inferiores a los 96 mm, teniendo el tercer cuartil en 80 mm y describiendo una distribución normal hasta ese punto.

Figura 3. Histograma de acumulados de precipitación para un Pr5



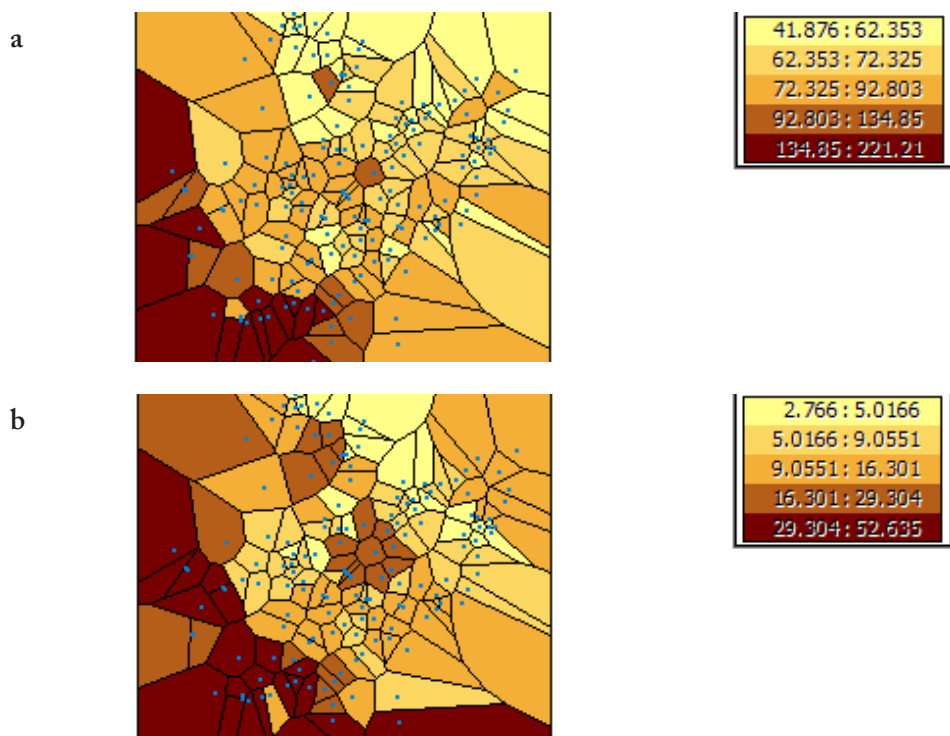
A continuación, se obtienen los mapas Voronoi de tipo simple (figura 4.a) y de desviación estándar (figura 4.b) de la distribución espacial de los períodos de retorno. Se construyen a partir de polígonos formados alrededor de los puntos de muestreo. Son un producto de interpolación basado en la distancia entre dos puntos que permite localizar el vecino más cercano y, por lo tanto, posibilita reconocer

la existencia de patrones; en este caso, de la distribución de los acumulados de precipitación. Las figuras indican valores más elevados y con una mayor desviación estándar en la porción suroeste.

Esta tendencia a un patrón espacial en los datos se comprueba mediante otras dos pruebas.

La Figura 5 corresponde a un análisis de tendencia espacial. Se observa cómo los valores de precipitación disminuyen en latitud (eje y) mientras que aumentan en la dirección oeste (eje x, la longitud es negativa).

Figura 4. Mapa Voronoi a. simple, b. desviación estándar



La segunda prueba es el semivariograma (figura 6), que permite ver la autocorrelación espacial; es decir, determina si las concentraciones de valores de precipitación tienen una distribución aleatoria o si existe una asociación significativa de valores similares o diferentes entre zonas vecinas. El eje x representa la distancia entre puntos en el plano, mientras que el eje y indica el valor del semivariograma. Si la distribución no es aleatoria, a medida que aumenta la distancia entre los pun-

tos también debe aumentar el valor del semivariograma. En este caso se observa una tendencia que muestra la existencia de un patrón en la distribución espacial.

Figura 5. Gráfico de tendencia espacial: X-longitud; Y-latitud; Z: valor de precipitación

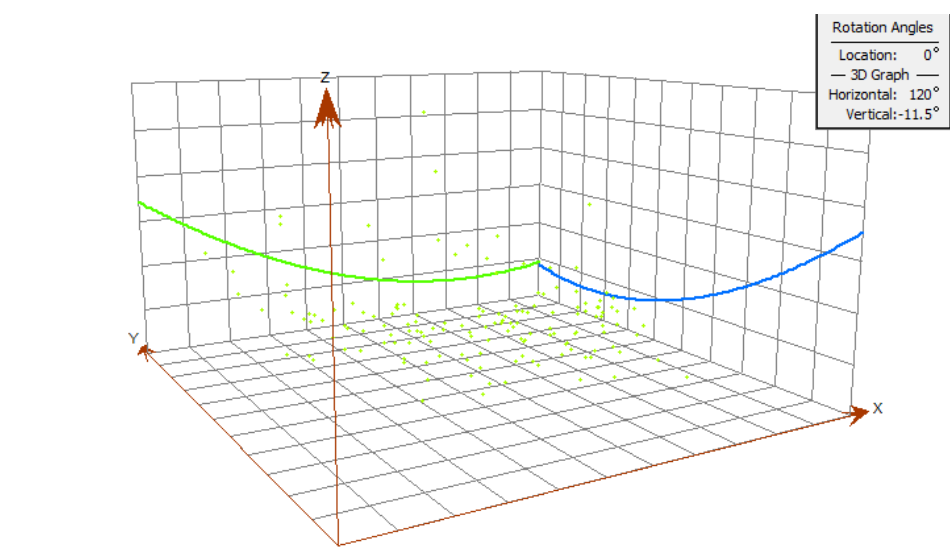
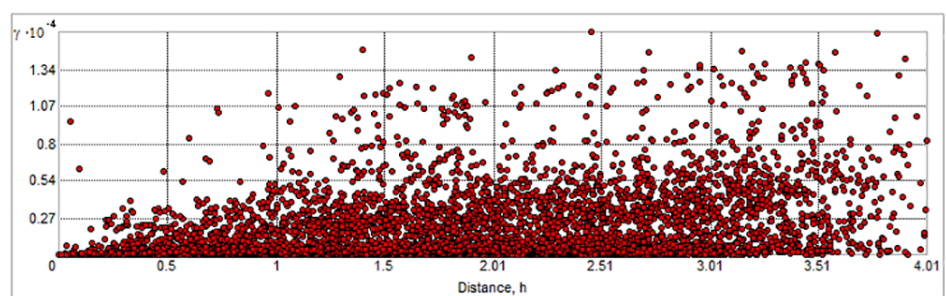
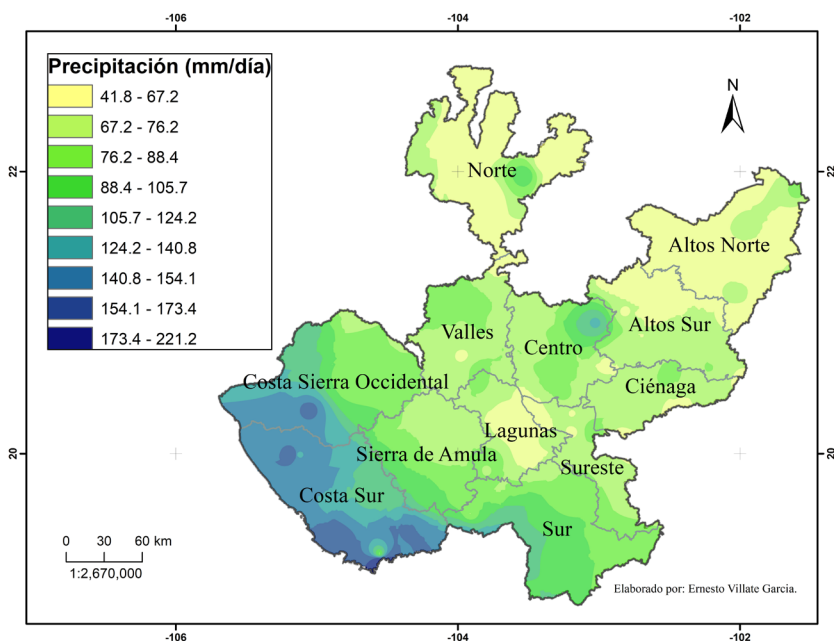


Figura 6. Semivariograma.



Asociado a estos resultados, se realiza la interpolación utilizando como máscara el estado de Jalisco y su división territorial para identificar las variaciones por regiones (figura 7). Se aprecia un claro patrón (corroborado por el análisis exploratorio de los datos) de distribución de lluvias máximas, con un aumento longitudinal de noreste a suroeste.

Figura 7. Distribución espacial de la precipitación máxima anual en 24 horas para un Pr5



Para las zonas de Costa Sierra Occidental, Costa Sur y la porción occidental del Sur y Sierra de Amula (remitirse a la figura 1 para relacionar las regiones) se puede esperar que ocurra al menos un episodio de precipitación en los próximos cinco años en el rango de 140 a 221 mm en 24 horas, sobre todo en zonas cercanas a la costa. Este resultado se deriva en gran medida a la influencia oceánica (con aumentos de los niveles de humedad relativa), al efecto orográfico causado por la Sierra Madre Occidental (efecto Foehn) y al impacto de organismos atmosféricos propios de la zona como los ciclones tropicales.

Las regiones Norte, Altos Norte y Altos Sur presentan los valores más bajos, entre 40 y 60 mm en 25 horas aproximadamente, siendo climatológicamente más secas. Se encuentran alejadas del Pacífico y reciben una subsidencia de los vientos, asociada a la propia cadena montañosa y a una mayor influencia de los centros anticiclónicos continentales.

Resalta, además, una diferencia meridional en la porción central del estado, con valores más elevados hacia Valles y Centro y una disminución hacia Lagunas y el norte de la región Sureste.

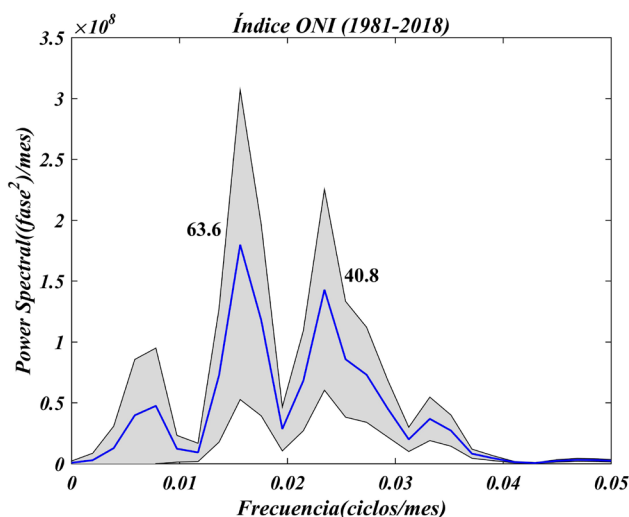
Análisis espectral

En este apartado, como se indicó en la metodología, se busca una posible relación entre las frecuencias más energéticas del espectro de oscilaciones del ENSO y de las estaciones seleccionadas en cada una de las regiones del estado (figura 1).

Para evaluar el ENSO, se utiliza el Índice Oceánico de “El Niño” (ONI por sus siglas en inglés), disponible en el sitio web: <http://ggweather.com/enso/oni.htm>. En la Figura 8, se observan dos picos de frecuencias más energéticas, correspondientes a períodos de 63.6 y 40.8 meses respectivamente. Por ello, llevando estos resultados a una escala anual, el índice ONI tiene una periodicidad típica alrededor de los 5.3 y 3.4 años, resultado que guarda relación con las conclusiones de Trenberth (1997).

En cuanto a las regiones (figura 9), en todos los casos se observa un rango de frecuencias energéticas que va desde 4.6 años en la zona Centro hasta los 6.4 años en la Sierra de Amula (franja roja), siendo la principal señal en siete de las regiones: Costa Sierra Occidental, Costa Sur, Norte, Sureste, Altos Norte, Altos Sur y Centro. Llama la atención que en cuatro de estos casos más energéticos el pico coincidió en los 5.3 años: Costa Sierra Occidental, Sureste, Altos Norte y Altos Sur. Por tanto, existe una relación entre la frecuencia principal con que se presenta el fenómeno ENSO (alrededor de los 5.3 años a partir del índice ONI) con este rango de frecuencias observado en todas las regiones.

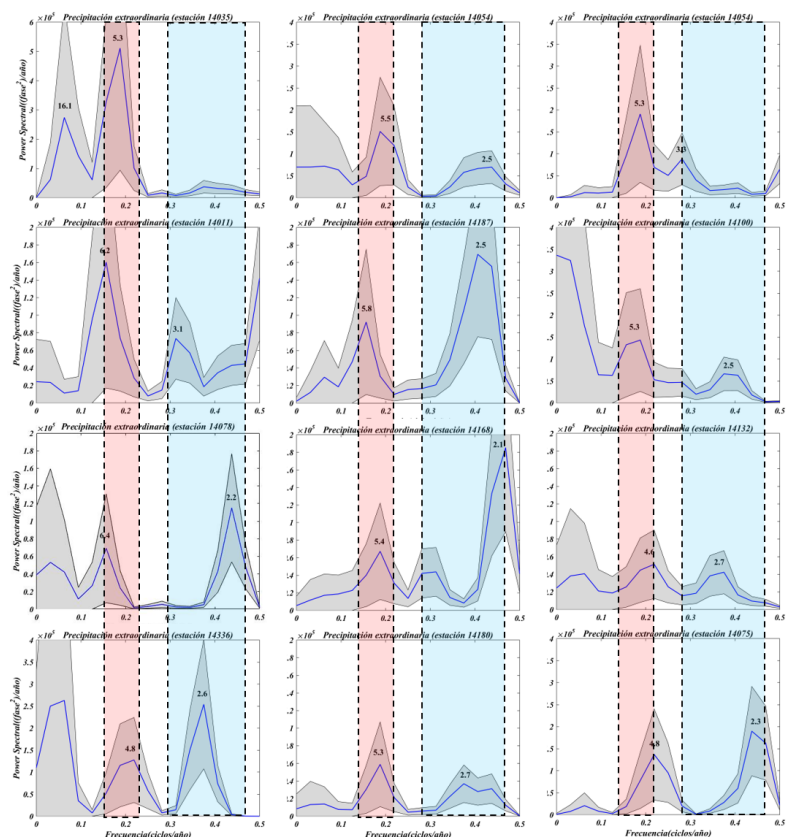
Figura 8. Espectro de frecuencias del índice ONI en el período 1981-2018



Destaca otra banda de picos energéticos localizado entre 2.1 años en Lagunas y 3.3 años en Altos Norte (franja azul). Estos períodos son principales para sus respectivas series temporales en cinco regiones: Sierra de Amula, Sur, Valles, Lagunas y Ciénaga. En este escenario, la relación con la segunda frecuencia más energética del ENSO (3.4 años) no es tan evidente como en el caso anterior. Sin embargo, considerando el grado de confianza bajo el cual se realiza el análisis (95%), y la variabilidad que presenta la oscilación en cuestión, el nexo se considera aceptable.

En cuanto a la distribución espacial, estos picos de frecuencias energéticas no exhiben un patrón evidente, mostrando una señal relativamente homogénea en toda el área. De ahí que no se puede discernir con claridad una mayor o menor influencia del ENSO por regiones en el estado de Jalisco.

Figura 9. Espectro de frecuencias de cada una de las estaciones representativas.
Las bandas roja y azul indican rangos de frecuencias



Conclusiones

A partir de un análisis espacio-temporal de los períodos de retorno y los espectros de frecuencias principales, en la presente investigación se logró identificar una serie de aspectos relacionados con la variabilidad climática de las lluvias extremas en el estado de Jalisco, los cuales se mencionan a continuación.

La metodología empleada proporciona información de utilidad sobre el fenómeno de lluvias máximas. La función de Gumbel representa un buen ajuste para las series temporales de valores máximos anuales de precipitación en 24 horas en todo el estado, por lo que se recomienda su uso en estudios posteriores. Por su parte, el período de estudio de 1981-2018 resultó adecuado para los respectivos análisis. Las lluvias máximas para un período de retorno de cinco años muestran una distribución espacial marcada por un patrón de incremento desde el noreste hacia el suroeste; mientras que se observa una variabilidad meridional en la porción central del territorio. A su vez, existe una marcada relación entre los períodos típicos del ENSO y la cantidad de episodios anuales de lluvias extremas, lo que induce una influencia de esta oscilación sobre la variable en estudio.

Se recomienda indagar en el posible vínculo de las precipitaciones extremas con oscilaciones de mayor frecuencia como la Oscilación Madden-Julian, así como definir patrones atmosféricos a diferentes escalas asociados con la ocurrencia de este peligro potencial.

Referencias bibliográficas

- Beguería, S. & Lorente, A. (1999). Distribución espacial del riesgo de precipitaciones extremas en el pirineo aragonés occidental. *Geographicalia*, 37, 1-15.
- Campos, D. (1998). Estimación estadística de la precipitación máxima probable en San Luis Potosí. *Ingeniería Hidráulica en México*, 3, 45-66.
- Carvalho, L., Jones, Ch. & Liebmann, B. (2004). The South Atlantic Convergence Zone: intensity, form, persistence, and relationships with intraseasonal to interannual activity and extreme rainfall. *Journal of Climate*, 17, 88-108.
- Cerano, J., Villanueva, J., Valdez, R., Arreola, J. & Constante, V. (2011). El Niño Oscilación del Sur y sus efectos en la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Nazas. *Revista Chapingo serie ciencias forestales y del ambiente*, 17, 207-215.
- Charles, J. (2000). Occurrence of Extreme Precipitation Events in California and Relationships with the Madden-Julian Oscillation. *Journal of Climate*, 13, 3576 – 3587.
- Díaz, G., Sánchez, I., Quiroz, R., Garatuza, J., Watts, C., Cruz, I. & Guajardo, R. (2011). Variación espacio-temporal de la precipitación pluvial en México: una aproximación a la evaluación de impactos. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 4, 51-64.
- García, E. (2003). Distribución de la precipitación en la República Mexicana. *Investigaciones Geográficas*, 50, 171-191.
- Gumbel, E. (1941). The return period of flood flows. *Annals of Mathematical Statistics*, 12, 163-190.
- Gutiérrez, J., Vargas, V., Romero, M., Plácido de la Cruz, J., Aguirre, M. & Silva, H. (2011). Periodos de retorno de lluvias torrenciales para el estado de Tamaulipas, México. *Investigaciones geográficas*, 76, 20-33.
- Haylock, M. & Nicholls, N. (2000). Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia, 1910–1998. *International Journal of Climatology*, 20, 1533-1541.
- Jáuregui, E. (2001). *Las precipitaciones extremas en la Ciudad de México. El tiempo del clima*. Valencia: Asociación Española de Climatología, 2001, 325-334.
- Jenkins, G. & Watts, D. (1968). *Spectral Analysis and its Applications*. San Francisco: Holden-Day.
- Katz, R. W., & Brown, B. G. (1992): Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Climatic Change*, 21, 289–302.
- Kunkel, K. (2003). North American Trends in Extreme Precipitation. *Natural Hazards*, 29, 291–305.
- Liebmann, B., Jones, C. & Carvalho, L. (2001). Interannual variability of extreme precipitation events in the state of Sao Paulo, Brazil. *Journal of Climate*, 14, 208–218.

- Maderey, L. (1980). Intensidad de la precipitación en el Valle de México. *Investigaciones geográficas*, 10, 325-334.
- Magaña, V., Pérez, J. & Conde, C. (1998). El fenómeno de El Niño y la oscilación del sur. Sus impactos en México. *Ciencias*, 51, 14-18.
- Méndez, J., Nívar, J., González, H. & Garza, E. (2007). Teleconexiones del fenómeno ENSO a la precipitación mensual en México. *Ciencia UANL*, 10, 290-298.
- Monjo, R. (2010). El índice n de la precipitación intensa. <https://www.researchgate.net/publication/268417628>. Visto 12/01/2020.
- Ramos, I., Guerrero, S. & Huerta, F. (2007). Patrones de distribución geográfica de los mamíferos de Jalisco, México. *Revista mexicana de biodiversidad*, 78, 175-189.
- Roy, S. & Balling, R. (2004). Trends in extreme daily precipitation indices in India. *International Journal of Climatology*, 24, 457-466.
- Sánchez, D. (2011). Precipitaciones extremas y sus implicaciones en procesos de remoción en masa en la planificación urbana de Tampico, México. *Cuadernos Geográficos*, 48, 135-159.
- Trenberth, K. (1997). The definition of El Niño. *American Meteorological Society*, 78, 2771-2777.

Capítulo X

Propuesta metodológica para el estudio y detección de granizos en el área metropolitana de Guadalajara, Jalisco

*Nivian Quintana Rodríguez*¹, *María del Rocío Castillo Aja*²,
*Omar García Concepción*³, *Julio César Morales Hernández*⁴

¹ Estudiante de Doctorado DGOT - CUCSH, Universidad de Guadalajara.

² Profesor Investigador CUCSH, Universidad de Guadalajara.

³ Profesor Investigador CUCEI - IAM, Universidad de Guadalajara.

⁴ Profesor Investigador Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara.

Resumen

La ocurrencia de granizo representa una amenaza considerable para la población y los bienes materiales en México. Según el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2014), es uno de los eventos que, desde el punto de vista local, ocasiona mayor cantidad de daños durante la época de lluvias. En Jalisco y, en particular en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), se contabilizan cada año un promedio de 16 eventos de fuertes tormentas con granizo (Instituto de Astronomía y Meteorología de la Universidad de Guadalajara (IAM), 2020), que impactan las actividades diarias de la sociedad y provocan daños materiales y a la población, con pérdidas económicas principalmente en los sectores de transporte terrestre y aérea, así como en las viviendas. La precipitación de granizos está determinada por la presencia de un fondo sinóptico (patrones de circulación atmosférica de superficie y aire superior) que propicia condiciones de inestabilidad y, por lo tanto, favorece el desarrollo de eventos de mesoescala, en cuyo seno se desarrollan fenómenos locales, o de microescala, que dan lugar a la precipitación de granizos en un espacio geográfico particular. En este trabajo se propone una metodología para el estudio y detección de los granizos en el AMG, la cual consiste en realizar un análisis multiescalar de la ocurrencia de los mismos, con base en los reportes de granizos del IAM, los datos de sondeos aerológicos de la estación Colomos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y los datos de reanálisis del *National Center of Environmental Prediction* (NCEP); con el objetivo de encontrar la relación entre la caída de

granizos en AMG y el campo de reflectividad de las imágenes del radar del IAM; y, por último corroborar y correlacionar la información, obtenida en los primeros pasos de la metodología, mediante la simulación de casos de estudio, utilizando un modelo numérico de alta resolución, en este caso el Weather Research and Forecasting (WRF) (Skamarock y Klemp, 2008).

Introducción

La ocurrencia de granizo representa una amenaza considerable para la población y los bienes materiales en México, según el CENAPRED (2014) es uno de los eventos que, desde el punto de vista local, ocasiona mayor cantidad de daños durante la época de lluvias. En Jalisco y, en particular en el AMG, se contabilizan cada año un promedio de 16 eventos de fuertes tormentas con granizo que impactan las actividades diarias de la sociedad, y provocan daños materiales y a la población, con pérdidas económicas principalmente en los sectores de transportación terrestre y aérea, así como en las viviendas.

García *et al.* (2007) elaboraron la climatología de las Tormentas Locales Severas (TLS) (dentro de las que se incluye la caída de granizos (Alfonso, 1994) para el AMG basada en los datos históricos tomados de diversas fuentes para el período 1950-2006. Por su parte, Acuña *et al.*, (2015) pronosticaron la ocurrencia de las mismas, a partir de la estimación de umbrales para los índices termodinámicos significativos. Sin embargo, no existen metodologías que se hayan aplicado en Jalisco y el AMG que permitan establecer los mecanismos de formación y desarrollo de las tormentas con granizos y que puedan utilizarse como herramienta para el pronóstico de estos hidrometeoros. Por lo tanto, resulta necesario contar con una metodología para estudiar la distribución espacial y temporal de la ocurrencia de granizo en el AMG, a partir de un análisis multi-escala (sinóptica, la mesoescala y la microescala) que permita obtener información significativa sobre la frecuencia de ocurrencia de granizo, necesaria para establecer la peligrosidad potencial de este fenómeno en el corto y mediano plazo.

Los granizos son precipitaciones en forma de hielo que se gestan dentro de tormentas eléctricas, las cuales ocurren fundamentalmente en verano o durante el comienzo del período lluvioso (período donde se concentran los mayores acumulados de precipitaciones de un país o región. Determinado climatológicamente, este periodo no necesariamente coincide con una estación del año) y los daños que provocan están en función de la cantidad y el tamaño del granizo que llega a tierra.

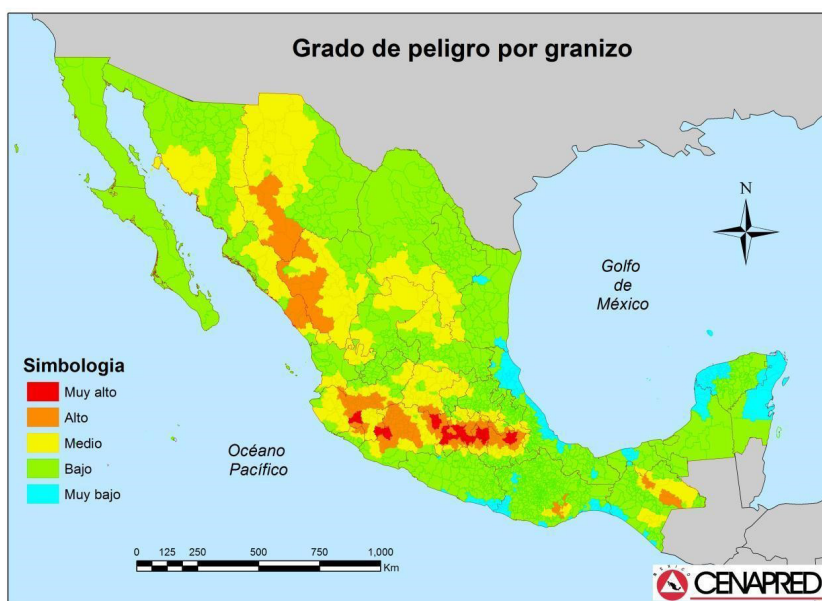
Mauelshagen (2011) planteó que el granizo es un peligro natural que no se puede controlar, por lo que la única alternativa es la adaptación. En los últimos años las tormentas de granizo, y el daño que se espera de ellas, han sido discutidos en el contexto del cambio climático (Cepeda, 2010), por lo que Brunetti *et al.* (2002) y

Piani *et al.* (2010) afirman que la ocurrencia de eventos climáticos extremos, como el caso de las tormentas de granizo, se ha incrementado alrededor del mundo, y posiblemente esté asociada con el cambio climático. En contraparte, autores como Pielke (2004) consideran que el aparente incremento puede ser debido a una mayor sensibilidad, conciencia y acceso a la información por parte de la sociedad.

En la República mexicana se registran granizadas en la región del Altiplano, particularmente en los valles de la porción sur de éste, en la Faja Volcánica Transmexicana (FVT), en la Sierra Madre Occidental, así como en la Sierra Madre del Sur y algunas regiones de Chiapas, Guanajuato, Durango y Sonora (figura 1) en donde se tiene la mayor incidencia durante los meses de mayo, julio y agosto (CENAPRED, 2012).

Buena parte del territorio del estado de Jalisco se localiza en la FVT, calificada con grados de peligro de medio a muy alto (CENAPRED, 2012). La distribución del peligro en el estado muestra un corredor en forma de “T” que se alarga hacia el Lago de Chapala, y hacia el sur en dirección del Complejo Volcánico de Colima, donde se localiza el área con más alto potencial de peligro en el estado; en particular, el AMG se localiza en la zona de alto peligro.

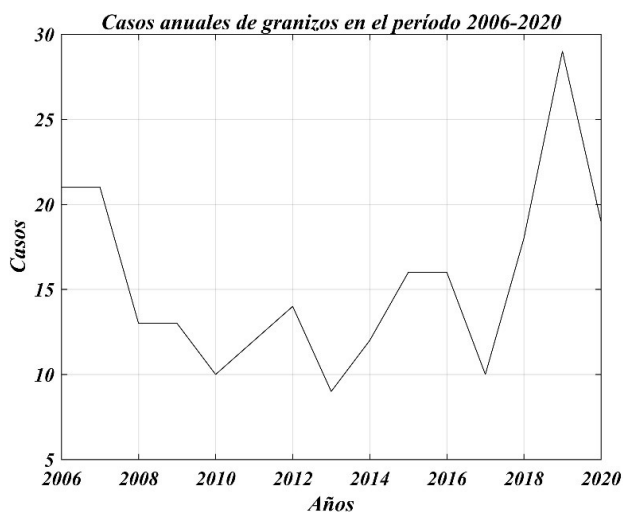
Figura 1. Mapa de grado de peligro de Granizos para México
(tomado de CENAPRED, 2012)



Las TLS en el AMG pueden ocurrir desde mayo hasta noviembre, en particular, en los meses de junio, julio y agosto; la mayoría se presentan durante horas de la tarde o de la noche, con un número no despreciable durante la madrugada. Por lo tanto, la ocurrencia de TLS en el AMG constituye una característica importante de su clima, debido a su alta frecuencia durante la estación lluviosa (García *et al.*, 2007).

La Figura 2 muestra los eventos de caída granizos reportados en la AMG para el período 2006-2020, con base en la información recogida por la cronología del IAM, donde se evidencia la alta frecuencia de ocurrencia en el área de estudio por estos hidrometeoros. Se utilizó este periodo ya que no existe otra fuente de información al respecto que tenga una resolución espacial y temporal tan alta, lo cual es muy útil para estudios de fenómenos tan locales, como es el caso de los granizos. Es importante destacar que los números aquí mostrados podrían ser superiores, debido a que las tormentas con granizos pudieron ocurrir en zonas donde no hubo personas que las reportaran o porque, aun cuando el lugar afectado estuviera poblado, no se realizó el reporte.

Figura 2. Cantidad de eventos de granizos por años en el AMG del 2006 al 2020, tomando la información de reportes de granizos de la base de datos del IAM

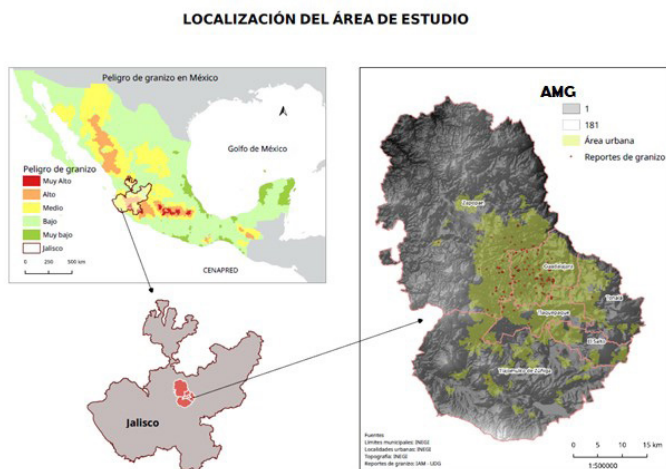


Área de estudio

Se toma como área de estudio el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG), la segunda más poblada de México, según datos del INEGI (2015), localizada en la

parte central del estado mexicano de Jalisco y conformada oficialmente por nueve municipios, de los cuales seis son considerados como centrales, es decir, que conforman un continuo urbano. Dichos municipios son: Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, El Salto y Tlajomulco de Zúñiga, los otros tres son: Juanacatlán, Ixtlahuacán de los Membrillos y Zapotlanejo, que son considerados como municipios exteriores pertenecientes a la zona metropolitana, pero que no forman parte de la urbanización continua (conurbación). Se seleccionó el área correspondiente al continuo urbano por ser el área en donde se concentra la mayor cantidad de población y, por consiguiente, por ser la zona con mayor potencial de afectaciones por la ocurrencia de granizos (figura 3). Se presentan los reportes de granizos del 2006 al 2018 porque son los datos a los cuales se les realizó un control de calidad donde se discriminan distintos reportes que corresponden a un mismo evento, mediante la localización y georreferenciación del lugar de ocurrencia.

Figura 3. Mapa de ubicación del área de estudio a partir de la intersección de los municipios principales del AMG y las localidades urbanas. Localización de los reportes de granizos del 2006 al 2018, registrados en la base de datos de TLS del IAM, UDG, datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2015)



Condiciones necesarias para la formación del granizo

Los sistemas convectivos que desarrollan tormentas con granizo dependen de procesos a gran escala, que desarrollen una estructura termodinámica adecuada, y de los procesos de mesoescala que actúan en el comienzo o disparo de la convec-

ción (Doswell III y Schultz, 2006). Por ello, se requiere de un ambiente sinóptico favorable para que los mecanismos de mesoescala inicien eficientemente un proceso convectivo.

Houze (1993) señaló el forzamiento orográfico como uno de los principales mecanismos de disparo de la convección, ya que la orografía puede producir fluctuaciones del flujo de viento en niveles bajos, formando líneas de convergencia (Watanabe y Ogura, 1987). Las discontinuidades del flujo de calor sensible y latente, que se producen en lugares donde existen diferentes tipos de superficie terrestre, también podrían actuar como mecanismo de disparo a nivel mesoescalar (Merino *et al.*, 2014).

Teóricamente existen tres condicionantes para que se pueda formar una tormenta con granizo: abundante humedad en niveles bajos de la tropósfera, inestabilidad atmosférica y un mecanismo de disparo que ayude a liberar la inestabilidad (Skaggs, 1980; Doswell III, 1987; Kunz *et al.*, 2009). Es decir, desde el punto de vista conceptual, se puede plantear que los procesos que intervienen en la generación, desarrollo y disipación de una TLS se pueden agrupar en tres condiciones necesarias y una condición suficiente (Rojas y Carnesoltas, 2013; Carnesoltas *et al.*, 2013).

Algunos autores destacan la importancia de la presencia de cizalladura vertical del viento en niveles altos (Skaggs, 1980), aunque otros plantean que la presencia de cizalladura no es un requisito imprescindible, pero podría aumentar las posibilidades de formación de granizo (Das, 1962). Por otro lado, los procesos advectivos tienen gran importancia en la precipitación en forma de granizos; los frentes derivados del flujo de salida de la convección, las brisas marinas, los levantamientos de aire en la parte delantera de los frentes fríos, pueden actuar como mecanismos de disparo de la convección (Carbone, 1982).

Propuesta metodológica para el estudio de granizos en el AMG

Aún no se han encontrado soluciones generales que permitan discriminar con total claridad la ocurrencia anticipada o no de granizos, aunque se conozcan las condiciones generales favorables. Esta es la razón por la que todavía no se ha podido aplicar en los pronósticos operativos diarios. En dichos esfuerzos se han empleado numerosos métodos con base tanto en razonamientos inductivos como deductivos.

En la aplicación de métodos enfocados en el razonamiento inductivo, los servicios meteorológicos de mayor desarrollo tienen organizadas bases de datos con reportes de los eventos (en este caso los granizos), que se emplean fundamentalmente en las validaciones estadísticas de las hipótesis que elaboran los investigadores y especialistas. Las fuentes de estas bases de datos son las propias observaciones y mediciones realizadas en sus redes de estaciones meteorológicas, y lo obtenido por los

instrumentos de detección remota; sin embargo, dadas las grandes distancias existentes entre los puntos de medición, comparadas con las pequeñas dimensiones de estos fenómenos, también se incluyen los reportes de la población en general, pues, a pesar de que no son tan detallados como de las fuentes profesionales, precisamente en este tipo de información está basada esta investigación.

Las bases de datos de granizo tienen tres limitantes:

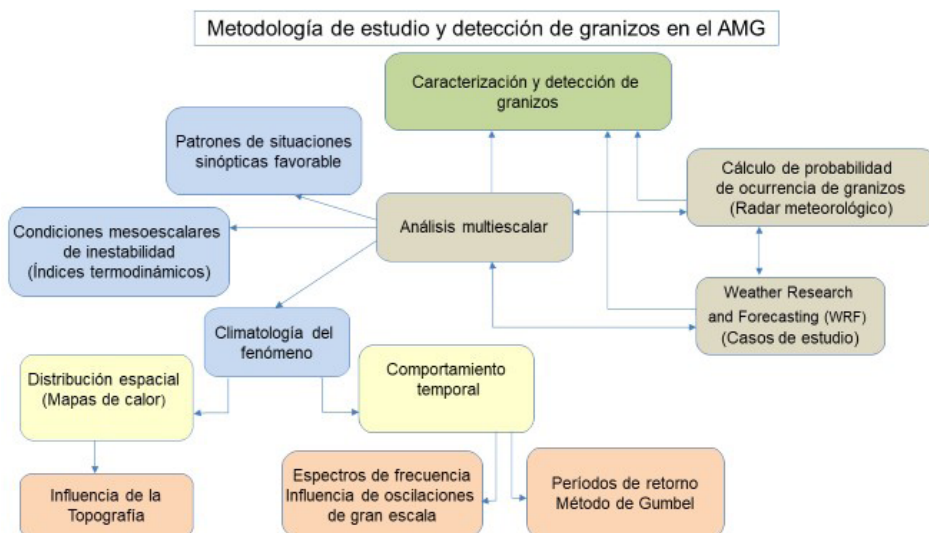
- el evento puede ocurrir en zonas despobladas donde nadie lo vea, o que, teniendo lugar donde se encuentre una persona, no lo informe;
- únicamente se dispone de los datos de las variables en los lugares donde están instalados los instrumentos; y
- sólo incluye el reporte de la ocurrencia del evento a nivel de la superficie, pero nunca podrá reflejar la existencia o no de las condiciones en los niveles medios que los provocan.

Por lo tanto, a continuación, se propone una metodología mixta que, a partir de análisis cuantitativos y cualitativos, permita desarrollar cada uno de los objetivos planteados. Según Prein y Holland (2018), se han utilizado tres enfoques para evaluar el impacto de la variabilidad climática y el cambio climático en la gran ocurrencia de granizo: 1) observaciones de granizo con estaciones de granizo o de informes de daños, con la limitante de que observar el granizo es difícil por estar altamente localizado; 2) la simulación dinámica de granizo con modelos numéricos (Adams-Selin y Ziegler, 2016), este enfoque proporciona una comprensión física de los mecanismos que están asociados con el cambio de las frecuencias de granizo pero tiene un alto nivel computacional, costos y grandes incertidumbres en la parametrización de los procesos involucrados; 3) las relaciones empíricas entre las propiedades ambientales y el granizo observado, las cuales se utilizan para relacionar las condiciones ambientales a gran escala (Brooks, 2009)

El enfoque que aquí se propone pertenece a la segunda y tercera categoría, utiliza ingredientes ambientales a gran escala para estimar las probabilidades de granizo y realiza simulaciones de estudio de casos particulares.

A continuación, se muestra el esquema de la metodología que se propone para el estudio y detección de granizos (figura 4).

Figura 4. Esquema representativo de la metodología propuesta para el estudio y detección de los granizos en el Área metropolitana de Guadalajara (AMG)



En el esquema se muestran los aspectos para abordar el objeto de la investigación (los granizos), así como la interrelación existente entre los tres enfoques a utilizar (análisis multiescalar, cálculo de probabilidad de ocurrencia y simulación con modelos numéricos).

A partir de lo planteado anteriormente se enumeran los pasos a seguir para llevar a cabo esta metodología, así como los métodos propuestos para desarrollarlos en cada caso.

Análisis de la distribución espacial de los episodios de granizos en el AMG mediante el uso de mapas calor

Para realizar el análisis se utilizarían los datos de reportes de ocurrencia de granizos que se obtuvieron de fuentes diversas por el Instituto de Meteorología y Astronomía (IAM) de la Universidad de Guadalajara (UDG). Se propone usar la técnica de los estimadores de densidad de núcleo (kernel), que permite generar con Sistemas de Información Geográfica (SIG), superficies y mapas representativos de las características del fenómeno en cuestión. Es necesario asociar esta información con las características topográficas propias del área de estudio y determinar la influencia de la misma en el comportamiento del fenómeno, para ello se

propone el uso de las Funciones Empíricas Ortogonales (EOF) (Lorenz, 1956), técnica que permite correlacionar variables tanto espaciales como temporales.

Este método fue desarrollado con el objetivo de encontrar una forma de extraer una representación compacta o simplificada, pero “óptima”, de datos con dependencia tanto espacial como temporal. Se propone la metodología para el cálculo de las mismas consideradas por Gutiérrez (2012), quien plantea que el análisis EOF intenta encontrar un número relativamente pequeño de variables independientes, (predictores; factores) que contengan la mayor parte posible de la información original sin redundancia, puede ser usado para explorar la estructura de la variabilidad de un conjunto de datos de una forma objetiva, y analizar las relaciones entre el conjunto de variables.

Se considera un conjunto de variables $P(x,t)$, que pueden representar valores de un parámetro en M localidades x como funciones del tiempo, contando con N observaciones:

$$P(x, t) = \sum_{k=1}^M F(k)Q(t)$$

Donde $F(x)$ son las funciones base desconocidas, independientes del tiempo, que serán las EOF; y $Q(t)$ son los coeficientes o amplitudes dependientes del tiempo también desconocidas. El número total de funciones F es el número de localidades donde está contenida la información espacial.

Estimación de densidad de kernel “puntos calientes”

Típicamente, los registros de eventos ligados al espacio se representan con puntos (reportes de granizo), esto implica la necesidad de métodos apropiados para extraer patrones de este tipo de datos. Sin embargo, los puntos normalmente no se asocian con ponderaciones —es decir, tienen una intensidad idéntica—, por lo tanto, se parte de la hipótesis de que hay una distribución desigual de los eventos y necesitamos herramientas para caracterizar dichos patrones. Dentro de la amplia gama de métodos de detección/visualización de patrones espaciales, los mapas de densidades son uno de los más populares, aunque en sentido estricto no son una técnica de “puntos calientes” sino una interpolación que se utiliza para identificar “puntos calientes”.

Las áreas donde se concentran los reportes de granizos son llamadas “puntos calientes”, y tienen como elementos definitorios la intensidad y la extensión. La extensión obedece a la escala o nivel del análisis, para algunos analistas la noción de “puntos calientes” se asocia únicamente con áreas pequeñas con altas concentraciones de eventos (Eck *et al.*, 2005).

La función que se asigna para la distribución en el espacio de las densidades es el primer supuesto fundamental. En este caso se propone el uso de una función triangular o cónica: describe el descenso lineal de la probabilidad de ocurrencia de un evento.

$$g(x_j) = \sum \left\{ K - \left(\frac{K}{h} \right) \right\} d_{ij}$$

Análisis de la distribución temporal de los casos de granizos en un periodo de estudio determinado

Se propone el uso de las técnicas de análisis de espectro de frecuencia y la estimación de periodos de retorno. Para el primer caso se deben elaborar dos series temporales en busca de la influencia de oscilaciones de baja y alta frecuencia.

El primer paso en el estudio de las series es un análisis previo o diagnóstico de la serie mediante su descripción estadística, donde se detallan los estadísticos, como el valor medio, intervalo modal, la desviación estándar y otros momentos de su distribución.

Análisis espectral

Aplicando esta técnica estadística, se conocen las principales frecuencias de variabilidad de una serie de tiempo. Para ello se emplea la Transformada de Fourier (TF), que es un algoritmo que transforma una serie del dominio del tiempo al dominio de las frecuencias y viceversa. La TF descompone las diferentes frecuencias que componen una serie (en senos y cosenos), con sus respectivas amplitudes y fases. Matemáticamente su relación se expresa como:

$$S_x(\omega) = \int_0^T x(t) e^{-i2\pi\omega t} dt = \int_0^T x(t) \cos(2\pi\omega t) dt - i \int_0^T x(t) \sin(2\pi\omega t) dt = a_x(\omega) - ib_x(\omega),$$

Donde $x(t)$ es la serie de tiempo, T es la longitud de la serie, ω es la frecuencia.

Para el análisis de la influencia de oscilaciones de baja frecuencia, se tomarían totales anuales de granizos en la búsqueda de posible señal de El niño-oscilación del Sur (ENSO) y la Oscilación Cuasi-Bienal (QBO) (Ebdon, 1960, Pawson *et al.*, 1993 y Holton y Lindzen, 1972), ambas por sus siglas en inglés, como patrones de variabilidad climática que pueden estar relacionados con el comportamiento de la ocurrencia de granizos en el área de estudio. Por otro lado, para el análisis de

oscilaciones de alta frecuencia, se utilizaría la ocurrencia o no diaria de granizos para encontrar la posible señal de la Oscilación de Madden-Julian (Madden y Julian, 1971-1972, Parker, 1973).

La variación en cuanto intensidad, duración y frecuencia de la ocurrencia de eventos hidrometeorológicos, en particular los granizos, se pueden identificar como un evento de variabilidad climática y están dadas mayormente por oscilaciones de gran escala, las cuales producen a su vez fenómenos de teleconexión a lo largo de todo el planeta. Aun cuando la mayoría de los estudios hablan sobre la influencia o relación de estas oscilaciones con los procesos locales de convección, en particular la lluvia intensa, se puede asumir que, por la alta correlación entre la lluvia y la ocurrencia de granizos en el AMG, estas pueden influir de forma directa o indirecta en los procesos de formación de los granizos y su comportamiento en el tiempo.

Período de retorno

El período de retorno es un concepto estadístico que intenta proporcionar una idea de hasta qué punto un suceso puede considerarse raro. Suele calcularse mediante el ajuste de distribuciones de probabilidad a las variables analizadas, con base en series de valores extremos registrados dentro de períodos iguales y consecutivos. El ajuste de los datos y la predicción de valores extremos suele realizarse mediante las distribuciones de Gumbel, Log-Pearson, raíz cuadrada del tipo exponencial, entre otras (Castillo, 2009), aunque lo idóneo es encontrar la distribución propia de los datos de estudio.

En este caso se propone utilizar la Distribución de Gumbel:

$$x = u - \frac{\ln(-\ln(F(x)))}{d}$$

$$F(x) = \int_{-\infty}^{\infty} F(x)dx = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T}$$

$$u = x - 0.450047 * \sigma$$

$$1/d = 0.779696 * \sigma$$

Donde: σ – desviación estándar

x – media aritmética

T - período de retorno

El cálculo de este estadígrafo permitiría discriminar los periodos donde se tendría la ocurrencia récord de eventos de granizos en el AMG:

Determinación de los patrones sinópticos favorables para la ocurrencia de granizos en el AMG

Análisis similares fueron realizados por Dessens (1986) en el sur de Francia, en donde analizó los ambientes favorables para el desarrollo de nubes de tormenta (*cumulonimbus*) donde se forman y precipitan los granizos. Kotinis y Zambakas (1989), por su parte, determinaron los patrones espaciales promedio de las variables sinópticas para la ocurrencia de granizos en Grecia.

A partir de los mapas de variables meteorológicas en diferentes niveles de la atmósfera, mediante el método de clúster, se determinarán los patrones sinópticos favorables para la ocurrencia de granizos en el área de estudio. Este método es frecuentemente implementado como una herramienta para clasificar “objetivamente” tiempo sinóptico.

En la vertical se considerarán 4 niveles de la tropósfera (1000, 850, 500 y 200 hPa) que constituyen los niveles básicos para el pronóstico del tiempo y con los que se quiere, además, mantener la utilidad práctica inmediata de los resultados a obtener. Igualmente, para la obtención de las diferentes configuraciones sinópticas, se definen como variables de trabajo en todos los niveles: la altura geopotencial, la temperatura, el campo de viento dividido en las componentes zonal (u) y meridional (v), y la humedad relativa.

La base de datos a utilizar sería los mapas de reanálisis del *National Center of Environmental Prediction* (NCEP), para una malla de 2,5 grados de resolución espacial, en el horario de las 00:00 UTC de cada día, con reporte de granizos del período 1990 a 2020.

El volumen de información disponible permite aplicar algunos métodos estadísticos básicos de los campos de las variables escogidas, para el periodo de abril a noviembre (meses del año con reportes de ocurrencia de granizos en el AMG).

El método empleado se basa en la técnica de *clúster* o conglomerados. Para esto, se someterá la base de datos a un proceso de reducción de variables mediante la utilización de un análisis de componentes principales. En la aplicación del método de clúster se prepone utilizar como técnica de agregación la basada en el promedio de las distancias euclidianas (Carnesoltas *et al.*, 2011).

Determinación de las condiciones termodinámicas favorables para la ocurrencia de granizos, mediante el cálculo de umbrales de índices representativos de la inestabilidad necesaria, para la ocurrencia de tormentas con granizos en el AMG
Con el fin de pronosticar la ocurrencia de granizos, López (2003) utiliza índices de estabilidad obtenidos a partir de radiosondas, además de otros datos que son

combinados con técnicas de aprendizaje automático, como regresión logística; Kagermazov (2012) usa las salidas del Modelo de Pronóstico Global (*Global Forecast System* (GFS)) para pronosticar granizo, sin emplear técnicas de aprendizaje automático, solo aplica un análisis estadístico sobre un conjunto de variables que son procesadas para calcular índices de inestabilidad; y Brooks *et al.* (2003) a partir de datos de reanálisis del National Centers for Environmental Prediction (NCEP), simulan, a través de datos modelados y corregidos, cómo se distribuye el granizo a nivel global.

Los índices de inestabilidad, como CAPE, Lift, K-Index, Total Totals, Showalter-Index, etc. (Gottlieb, 2009), se obtienen a partir de variables atmosféricas como presión, altura, temperatura, temperatura de rocío, entre otras. Su principal utilidad es brindar una herramienta de exploración de condiciones de convección. Tradicionalmente estos índices se calculan utilizando radiosondas que son lanzadas desde aeropuertos internacionales, o estaciones de sondeo, el problema es que la densidad de puntos de observación es muy baja. Por este motivo, además de los datos de sondeos meteorológicos de la estación de Colomos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), se utilizarán los datos de *Global Forecast System* (GFS).

En este trabajo se propone utilizar, para el cálculo de los índices, datos del sondeo disponibles en la estación y los valores de los mismos pronosticados por el GFS, que es un sistema de predicción numérica del tiempo que se corre diariamente por el *US National Weather Service* (NWS) para generar pronósticos a corto plazo. Estos datos están disponibles cuatro veces al día con cobertura global en formato de grilla, con una resolución espacial de 0.25 grados (NOAA, 2014).

Relación entre ocurrencia de granizos en AMG y el campo de reflectividad de las imágenes del radar del IAM

Una vez detectado el inicio o las condiciones favorables para el desarrollo de los sistemas convectivos que producirán granizo en superficie, el siguiente paso y el más complicado reside en la predicción o cálculo de probabilidad de ocurrencia de granizos a partir de la determinación de valores umbrales de reflectividad del radar meteorológico (Knight *et al.*, 1982; Schmid *et al.*, 1992; López, 2003, entre otros), ya que es este el que tiene el tipo de resolución espacial y temporal deseado para este tipo de estudios. Con estas técnicas de observación se intentará determinar la probabilidad de granizo, la trayectoria y la intensidad de la tormenta.

En este caso se propone verificar las correlaciones estadísticas que se obtengan con la mayor cantidad posible de días con y sin reportes, con la presencia de nubes de tormentas en el área, utilizando observaciones de radar. Para ello, además del trabajo que conlleva su ejecución cuando se dispone de cientos de reportes, hay que tener en

cuenta que la presencia de una nube de tormenta en el área no asegura que se libere la energía acumulada en los niveles medios dentro de la tormenta, ya que puede tratarse de una tormenta eléctrica simple sin ninguna manifestación de severidad.

La identificación de la convección profunda productora de granizos, a partir del radar, se centra principalmente en dos aspectos: uno principalmente meteorológico, en el que se intentan detectar células convectivas que puedan resultar potencialmente peligrosas, y otro mayoritariamente hidrometeorológico, mediante el cual se pretende caracterizar el tipo de precipitación identificada.

Si bien el radar convencional no proporciona una medida directa del tamaño del granizo, ya sea por tener polarización en una sola dirección o por la longitud de onda del radar, se pueden llegar a obtener parámetros que sean indicadores de su probabilidad de formación o de su tamaño.

Donaldson (1959) concluyó que en el 50% de las celdas de tormenta, cuyo valor del factor de reflectividad es superior a 50 dBZ y con más de 12.2 km de altura, hay presencia de granizo; si sólo se considera la altura de la celda de tormenta, por su parte Waldvogel *et al.* (1979) utilizaron la altura máxima del eco de 45 dBZ en la banda S como medida de la velocidad de la corriente ascendente y 1.4 km de altura para determinar la presencia de granizos.

Es importante señalar que la mayoría de los estudios en este sentido se realizaron en zonas extra tropicales, donde la altura de la tropopausa es menor que en los trópicos. Por ejemplo, en la gran planicie de los Estados Unidos hay reportes de granizos en nubes de 9 km de altura, tal como ocurrió en la granizada del 23 de junio de 2010, en Vivian, Dakota del Sur, EE.UU., calificada como el récord de tamaño de granizo en América del Norte por la Sociedad Americana de Meteorología (AMS), con granizos de 20 cm de diámetro, 50 cm aproximados de circunferencia y un peso de 900 g. Otro ejemplo es la granizada ocurrida en Guadalajara, Jalisco, México, el 29 de junio del 2019, donde las nubes alcanzaron los 18 km de altura. La zona donde se concentran nubes lo suficientemente altas como para contener núcleos de hielo se conoce como corredor del granizo, y abarca parte de Jalisco y Michoacán, “cruza todo el país por el eje volcánico y llega hasta la sierra de Veracruz y al menos cinco veces al año se producen granizadas” (SMN para BBC, 2019).

Estimación del granizo

Los parámetros que mejor pueden estimar el granizo y su tamaño, gracias a que miden las condiciones medioambientales favorables para que el fenómeno se produzca, son el VIL (Greene y Clark, 1972, *American Meteorological Society* (AMS) y la densidad de VIL (Amburn y Wolf, 1997) —dependiendo del método empleado—, el

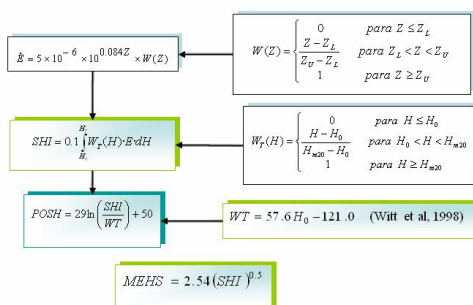
parámetro de Waldvogel (1979) y la combinación de distintas variables termodinámicas, todos ellos basados en relaciones empíricas. Utilizar un criterio u otro depende de la zona de estudio y de las condiciones medioambientales más favorables para cada caso. Es por ello que para mejorar la predicción del fenómeno es necesario integrar los parámetros y así obtener índices apropiados para el pronóstico de granizos.

Todos los criterios y combinaciones de variables termodinámicas están incluidos en algoritmos que trabajan automáticamente para estimar el tamaño del granizo, como por ejemplo el *Interactive Hail Detection Algorithm* (HDA) de la NOAA (Smart y Alberty, 1985; Witt *et al.*, 1998; Wilson *et al.*, 2004).

En este caso se propone el uso del algoritmo elaborado por Ceperuelo (2008), el cual se basa en establecer la probabilidad de granizo severo y estimar el tamaño máximo del pedrisco en superficie. Se parte de la ecuación de la energía cinética obtenida mediante el uso del radar meteorológico (Waldvogel *et al.*, 1979) y el paso siguiente consiste en calcular el índice de granizo severo, el cual potencia aquellas reflectividades que se encuentran a alturas superiores a la isoterma de 0 °C y a la isoterma de -20 °C. El primer umbral se utiliza como indicador del nivel a partir del cual se obtiene la formación de hielo y el segundo es aquel nivel con gran probabilidad de formación de granizo severo (Browning, 1977; Nelson, 1983; Miller *et al.*, 1988). Posteriormente, a partir de unas determinadas relaciones empíricas entre los ecos de reflectividad y los índices obtenidos, se calcula la probabilidad de granizo severo (POSH) y el tamaño máximo estimado (MEHS). Para la obtención del índice POSH ha sido empleada una dependencia empírica, la relación entre el umbral de alerta o *Warning Threshold* y la isocero, obtenida por Witt *et al.* (1998).

El esquema de la metodología empleada y sus ecuaciones se puede ver en la Figura 5, en ella se muestra el diagrama de flujo de la metodología a seguir para llegar a la obtención de la probabilidad de granizo severo.

Figura 5. Esquema de obtención del flujo de energía cinética, MEHS, SHI y de la POSH (Witt *et al.*, 1998) tomado de Ceperuelo (2008)



E es el flujo de energía cinética, Z es la reflectividad, $W(Z)$ es la función escalón, considerando unos límites de reflectividad superior (UZ), e inferior (LZ), SHI es el Índice de Granizo Severo, E es la energía cinética, H es la altura, $W(Z)H$ es la función escalón de alturas, $0H$ es la altura de la isocero, $20H$ es la altura de la isoterma de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $POSH$ es la probabilidad de observación de granizo severo y WT es el umbral de alerta.

La obtención de los parámetros empíricos debe hacerse basada en las características propias del AMG y las relaciones existentes entre los parámetros del radar y los eventos de granizo ocurridos en el periodo de estudio.

Analizar los procesos locales y a escala de nube con mayor precisión, y corroborar los resultados obtenidos en los pasos 1 al 4 de la presente metodología

Por último, y no menos importante, se propone comparar los resultados obtenidos estadísticamente con corridas de un modelo numérico de alta resolución. La dificultad que presenta esta metodología es que, hasta el momento, ningún modelo numérico es capaz, por sí solo, de pronosticar la ocurrencia certera de un evento discreto considerado severo (Carnesoltas, 2019).

Romero *et al.*, (2005) plantean que la combinación del estado sinóptico de la atmósfera, asociado a eventos de precipitación convectiva severa y a la fuerte influencia de la topografía, hace que sea posible utilizar la predicción de modelos de mesoescala para la mejora de las previsiones. En los últimos años, el uso generalizado de este tipo de modelos en la predicción del tiempo ha proporcionado un conocimiento más detallado de las relaciones existentes entre los ambientes sinópticos, los factores desencadenantes de convección a mesoescala en una región en particular y las consecuencias que ambos tienen sobre las características espaciales de los patrones de precipitación (García- Ortega *et al.*, 2011).

Se propone realizar simulaciones de casos de estudio con el modelo hidrodinámico *Weather Research and Forecasting* (WRF), (Skamarock *et al.*, 2005), el cual es muy utilizado en el mundo para estos fines. Por ejemplo, el Grupo de Física de la Atmósfera (GFA) de la Universidad de León (ULE) de España, trabaja en el ámbito de la meteorología sinóptica y mesoescalar, centrada en el estudio de eventos de convección con resultado de precipitación líquida o sólida, y para ello utiliza el modelo WRF. Gascón (2015) en su tesis doctoral trabajó en la mejora de la predicción de episodios convectivos o precipitaciones de gran intensidad, ya sean de nieve o granizo, a partir del uso del modelo WRF y los datos obtenidos en medidas en continuo por un radiómetro de microondas multicanal (MMWR). Litta *et al.* (2012) simularon varias tormentas eléctricas que ocurrieron en la época del pre-monsón (mayo) de 2006, 2007, 2008 y 2009 en el este de la India, utilizando el modelo WRF en una resolución espacial (3 km) y obtuvieron como resultado que con el esquema

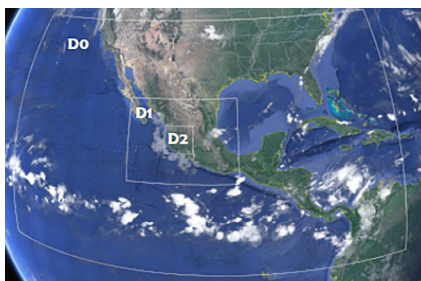
de parametrización de la microfísica de Ferrier y en la resolución de 3 km el WRF es una herramienta capaz de reproducir las condiciones en las que se generan las tormentas eléctricas y servir de pronóstico de estos fenómenos severos.

Una de las ventajas del WRF es que se trata de un modelo no hidrostático y presenta la capacidad de anidar varios dominios, consiguiendo aumentar la resolución horizontal de manera notable respecto a los modelos globales. Las principales características del modelo WRF son que posee la capacidad de realizar un anidamiento múltiple con interacción en dos direcciones posibles: en dos direcciones (*two-way*) o en una dirección (*one-way*) entre los dominios, lo que nos permite aumentar en gran medida la resolución horizontal y vertical del área de estudio. Se adapta muy fácilmente a múltiples plataformas informáticas, de manera que se puede ejecutar de forma multitarea con computadoras de memoria compartida o distribuida.

El modelo WRF realiza una inicialización del modelo de forma automática, tomando como datos de inicialización diferentes fuentes de datos atmosféricos y observaciones, tales como radiosondeos, estaciones meteorológicas, etc. También permite realizar lo que se conoce como asimilación de datos en 4 dimensiones, incorpora uno de los esquemas más realistas y mejorados de forma continua de parametrizaciones relacionadas con la radiación atmosférica, microfísica de nubes y precipitación, convección por cúmulos, turbulencia y flujos de energía y momento sobre la superficie terrestre.

El dominio computacional para el modelo WRF fue diseñado por especialistas del IAM (Comunicación personal) de la siguiente manera: tres dominios anidados, el más externo (D0) con una resolución espacial de 15km (600x500 puntos de malla), el intermedio (D1) con 5km de resolución espacial (450x500 puntos de malla) y el interno (D2) de mayor resolución con 1km (600x600 puntos). Los tres dominios como se muestran en la Figura 6, tienen su centro en los 20.66° de latitud Norte y 103.35° de longitud Oeste.

Figura 6. Dominios anidados del WRF, con una relación de 1/5 para D0 y D1, y 1/3 para D1 y D2



A continuación, en la Tabla 2 se enumeran las parametrizaciones que se proponen en la configuración para realizar las simulaciones con el WRF.

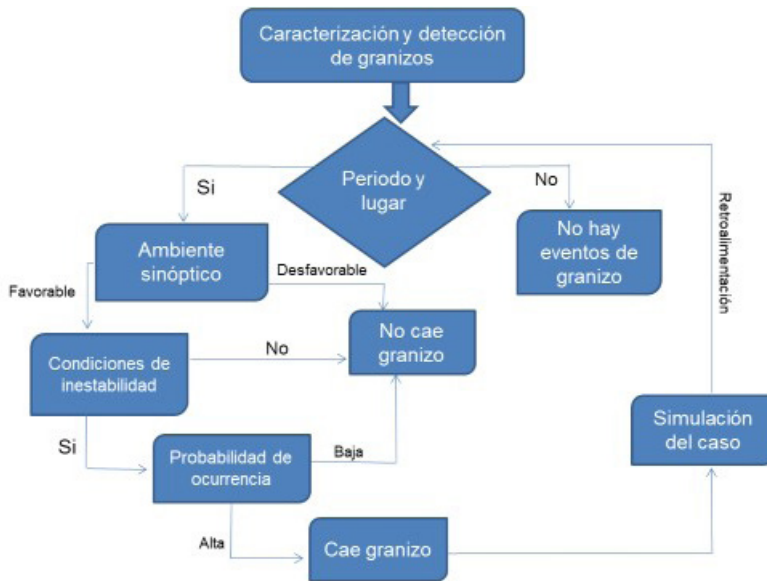
Parametrizaciones físicas del WRF			
Dominio	D0	D1	D2
Cúmulo	Esquema Arakawa-Schubert Simplificado	Esquema modificado de Tiedtke	Sin cúmulo
Microfísica	Esquema WSM con 6 clases - graupel	Esquema WSM con 6 clases - graupel	Microfísica de Ferrier (Nuevo Eta)
Capa límite planetaria	Esquema híbrido EDMF GFS	Esquema YSU	Esquema Mellor-Yamada-Janjic TKE
Física de superficie	Esquema NCEP GFS		Esquema Monin-Obukhov
Superficie del suelo	Modelo de superficie Noah unificado		
Radiación de onda larga	Esquema RRTMG		Esquema RRTM
Radiación de onda corta	Esquema RRTMG		Esquema Dudhia

Para llevar cabo los seis pasos que completan la metodología planteada, se requiere un engranaje que permita poner en marcha todos los procesos mencionados con anterioridad, el cual se muestra esquematizado en el diagrama de flujo de la Figura 7.

Mediante el análisis multiescalar, a partir de los estudios de distribución espacial y temporal, se determinan las zonas más susceptibles para la caída de granizos, así como la frecuencia de ocurrencia de los mismos, estableciendo su comportamiento climatológico. Posteriormente se obtienen las condiciones sinópticas favorables para su formación y desarrollo que, junto a los mecanismos de disparos en la mesoescala, propician la caída de estos hidrometeoros. Una vez detectadas las condiciones se realiza el cálculo de probabilidad de ocurrencia de los mismos con el apoyo del radar meteorológico y sus productos, los cuales son estimadores de las características microfísicas de la convección que da lugar a los eventos severos con granizo en el AMG.

Por último, los resultados obtenidos de la simulación de los eventos servirían para retroalimentar el sistema completo que permitiría esclarecer cada vez más los mecanismos de formación y desarrollo de los granizos y así llegar a realizar pronósticos cada vez más certeros.

Figura 7. Diagrama de flujo de la metodología de identificación y detección de granizos



Conclusiones

Se propone una metodología con base en el estudio multiescalar de las condiciones necesarias para la ocurrencia del granizo en el AMG. La metodología podría resultar útil en la caracterización de estos fenómenos hidrometeorológicos, ya que parte de la premisa de formación de los mismos basada en la interrelación de procesos en varias escalas espacio-temporales de la meteorología.

Una ventaja de esta metodología es que permitirá detectar y monitorear los eventos de granizos en el área metropolitana. Esta metodología se basa en ecuaciones o relaciones empíricas, adaptadas a la región de estudio y al tipo de radar meteorológico empleado.

El paso 6 de la metodología resulta de suma importancia para lograr los objetivos de caracterizar y detectar granizos en el AMG, ya que la información obtenida servirá para retroalimentar el modelo teórico conceptual del que parte esta metodología, y permitirá adecuar en mayor medida los modelos y métodos planteados al área de estudio y sus características.

Referencias bibliográficas

- Acuña, M. G. (2015). Valores útiles del sondeo para pronósticos de tiempo severo durante el temporal de lluvias en la Zona Metropolitana de Guadalajara. Tesis Profesional-Meteorólogo Militar, pp. 104.
- Adams-Selin, R. D. y Ziegler, C. L. (2016). Pronosticando granizo usando un modelo unidimensional de crecimiento de granizo dentro de WRF. *Lun. Weather Rev.*, 144 (2016), págs. 4919 – 4939.
- Alfonso, A. (1994). Climatología de las tormentas locales severas. Ed. Academia. La Habana, 85 pp.
- Amburn, S. y Wolf, P. (1997). VIL Density as a Hail indicator. *Wea. Forecasting*, 12, 473-478. AMS Glossary, American Meteorological Society Glossary, <http://amsglossary.allenpress.com/glossary>
- Brooks, H. E. (2009). Sondeos de proximidad para convección severa en Europa y Estados Unidos a partir de datos de reanálisis. *Atmos Res.*, 93, págs. 546 – 553.
- Brooks, H.E., Lee, J.W., Craven, J.P. (2003). The spatial distribution of severe thunderstorm and tornado environments from global reanalysis data. *Atmospheric Research*. 67, 73-94 (2003), <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169809503000450>
- Browning, K. A. (1977). The structure and mechanisms of hailstorms. Hail: A Review of Hail Science and Hail Suppression. *Meteor. Monogr.*, 16, 38, 1–43.
- Brunetti, M., Maugeri, M. y Nanni, T. (2002), Atmospheric circulation and precipitation in Italy for the last 50 years, *Int. J. Climatol.*, 22, 1455– 1471.
- Carbone, R. E. (1982). A Severe Frontal Rainband. Part I. Stormwide Hydrodynamic Structure. *J. Atmos. Sci.*, 39, 258–279, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1982\)039<0258:ASFRPI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1982)039<0258:ASFRPI>2.0.CO;2).
- Carnesoltas, M. (2019). Tormentas Locales Severas. Tres Condiciones Necesarias. *Revista Cubana de Meteorología*, Vol. 25, Núm. 1, 2019, E-ISSN: 0864-151X.
- Carnesoltas, M., Sierra, M., Rabelo, D. y Fernández, E. (2013). Factores físicos que influyen en la caída de Granizos y en las Aeroavalanchas sobre Cuba. Informe de Resultado. INSMET, 65 pp.
- Carnesoltas, M. y Aguilar, G. (2011). Condiciones sinópticas favorables para la aparición de tormentas locales severas en Cuba. Periodo lluvioso. *Rev. Cubana de Meteor.*, 17, 1, 13 - 31.
- Castillo, J. A. (2009). Modelización estocástica de precipitaciones máximas para el cálculo de eventos extremos a partir de los periodos de retorno mediante R. Archivado el 4 de marzo de 2016 en la Wayback Machine.
- CENAPRED. (2014). Tormentas Severas, Serie Fascículos, Sistema Nacional de protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Informe oficial Secretaría de Gobernación, México.

- CENAPRED (2012). Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos Hidrometeorológicos, Sistema Nacional de Protección Civil, Centro Nacional de Prevención de Desastres. Informe oficial Secretaría de Gobernación, México.
- Cepeda, E. (2010). Recopilación histórica y análisis climatológico de eventos de granizada ocurridos sobre Bogotá y su relación con el cambio climático global. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil y Agrícola, Maestría en Ingeniería y Recursos Hidráulicos.
- Ceperuelo, M. (2008). Identificación y caracterización del granizo mediante el radar meteorológico. Modelos de predicción del ciclo de vida de las células convectivas. Tesis doctoral, Programa de doctorat d'Astronomia i Meteorologia Bienni 2002-2004. Departament d'Astronomia i Meteorologia.
- Das, P. (1962). Influence of Wind Shear on the Growth of Hail. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 19, 407 – 414
- Dessens, J. (1986). Hail in Southwestern France. I.: Hailfalls characteristics and hailstorm environment. *J. Climate Appl. Meteor.*, 25, 35-47
- Donaldson, R. J., Jr. (1959). Analysis of severe convective storms observed by radar II. *J. Meteor.*, 16, 281-287, doi:10.1175/ 1520-0469(1959)016;0281: AOSCSO.2.0.CO;2.
- Doswell III, C. y Schultz, D. (2006). On the Use of Indices and Parameters in Forecasting Severe Storms. *Electronic J. Severe Storms Meteor.*, 1(3), 1-22.
- Doswell, C.A.III. (1987). The distinction between large-scale and mesoscale contribution to severe convection: A case study example. *Wea. Forecasting*, 2, 3-16.
- Ebdon, R. A. (1960). Notes on the wind flow at 50 mb in tropical and subtropical regions in January 1957 and January 1958. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 86, 322-331.
- Eck, T.F., Holben, B.N., Dubovik, O., Smirnov, A., Goloub, P., Chen, H.B., Chatenet, B., Gomes, L., Zhang, X.-Y., Tsay, S.-C., Ji, Q., Giles, D. y Slutsker, I. (2005). Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical mid-Pacific. *Journal of Geophysical Research* 110: doi: 10.1029/2004JD005274. ISSN: 0148-0227.
- García, C. O., Ramírez, H. U., Gutiérrez, J., Meulenert, A. y Guadalupe, M. E. (2007). Climatología de las tormentas eléctricas locales severas (TELS) en la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*: ISSN 0188-4611, Núm. 63, 2007, pp. 7-16
- García-Ortega, E., López, L., y Sánchez, J. L. (2011). Atmospheric patterns associated with hailstorm days in the Ebro Valley, Spain, *Atmos. Res.*, 100, 401-427, 2011.
- Gottlieb, R. (2009). *Analysis of stability indices for severe thunderstorms in the north-eastern United States*. Ph.D. thesis

- Gutiérrez, G. (2012). *Apuntes de conferencias. Asignatura: "Métodos de Recepción Remota"*. Programa: Maestría en Hidrometeorología, Guadalajara, Jalisco, México.
- Houze, R. A. (1993). *Cloud Dynamics*. Academic Press, 573 pp.
- Holton, J.R. y Lindzen, R. S. (1972). An updated theory for the quasi-biennial oscillation of the tropical stratosphere. *J. Atmos. Sci.*, 29, 1076-180.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía: INEGI (2015). ed. Censo de población y vivienda- Estados Unidos Mexicanos, Resultados Definitivos por Entidad y Municipio, (HTML).
- Kagermazov, A.K. (2012). The forecast of hail based on the atmospheric global model (t254 ncep) output data. *Russian Meteorology and Hydrology* 37(3), 165-169.
- Knight, C.A., Smith, P. y Wade, C. (1982). Storm types and some radar reflectivity characteristics. The National Hail Research Experiment, P. Squires and C. A. Knight, Eds., Vol. 1, Hailstorms of the Central High Plains, Colorado Associated University Press, 81-93.
- Kotinis-Zambakas, S. R. (1989). Average spatial patterns of hail days in Greece. *J. Climate*, 2, pp. 508-511.
- Kunz, M., Sander, J. y Kottmeier, Ch. (2009). Recent Trends of Thunderstorm and Hailstorm Frequency and their Relation to Atmospheric Characteristics in Southwest Germany. *International Journal of Climatology*. 29, 2283 – 2297.
- Litta, A. J, Mohanty, U. C. y Sumam Mary Idicula, (2012). The diagnosis of severe thunderstorms with high-resolution WRF model, *J. Earth Syst. Sci.* 121, Núm. 2, Abril, 2012, pp. 297-316.
- López, L., 2003: Convección atmosférica severa: pronóstico e identificación de tormentas con granizo. Tesis Doctoral, Universidad de León, Instituto de Medio Ambiente. 207 pp.
- MADDEN, R.A. y Julian, P.R. (1971). Detection of a 40- 50 day oscillation in the zonal wind in the tropical Pacific. *J. Atmos. Sci.*, 28, 1971, pp. 702-708.
- MADDEN, R.A. y Julian, P.R. (1972). Description of Global-Scale Circulation Cells in the Tropics with a 40-50 Day Period. *J. Atmos. Sci.*, 29, 1972. p. 1109- 1123.
- Mauelshagen, F. (2011). Sharing the Risk of Hail: Insurance, Reinsurance and the Variability of Hailstorms in Switzerland, 1880-1932. *Environment and History* Vol. 17, No. 1, Uncertain Environments (February 2011), pp. 171-191.
- Merino, A., Wu, X., Gascón, E., Berthet, C., García-Ortega, E., and Dessens, J. (2014). Hailstorms in southwestern France: Incidence and atmospheric characterization, *Atmospheric research*, 140, 61-75, 2014.
- Miller, L.J., Tuttle, J.D. y Knight, C.A. (1988). Airflow and hail growth in a severe northern High Plains supercell. *J. Atmos. Sci.*, 45, 736-762.
- Nelson, S. P. (1983). The influence of storm flow structure on hail growth. *J. Atmos. Sci.*, 40, 1965-1983.

- NOAA - National Weather Service (2014). GFS half degree documentation. http://nomads.ncep.noaa.gov/txt_descriptions/GFS_half_degree_doc.shtml.
- PARKER, D. E. (1973). Equatorial Kelvin waves at 100 milibars. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* 1973.99 116– 129.
- Pawson, S., Labitzke, K., Lenschow, R., Naujokat, B., Rajewski, B., Weisner, M. y Wohlfahrt, R. (1993). Climatology of the Northern Hemisphere stratosphere derived from Berlin analysis. Part 1: Monthly means. *Meteorologische abhandlungen (Neue Folge)*, Verlag von Dietrich Reimer, 141 pp.
- Piani, C., Haerter, J. O., y Coppola, E. (2010). Statistical bias correction for daily precipitation in regional climate models over Europe, *Theor. Appl. Climatol.*, 99, 187, doi:10.1007/S00704-009-0134- 9.
- Pielke, R.A. (2004). ¿Qué es el cambio climático? *Energía y Medio Ambiente*, 15 (3), 515–520. <https://doi.org/10.1260/0958305041494576>
- Prein, A; Holland, G. (2018). Estimaciones globales de peligro de granizo perjudicial. *Weather and Climate Extremes*, 22, 10-23, <https://doi.org/10.1016/j.wace.2018.10.004>
- Rojas, Y. y Carnesoltas, M. (2013). Configuraciones típicas que adoptan los campos de viento y temperatura a meso escala en la región oriental bajo la influencia de los patrones a escala sinóptica favorables para las tormentas locales severas. Informe de Resultado. INSMET, 116 pp.
- Romero, R., Martín, A., Homar, V., Alonso, S. y Ramis, C. (2005). Predictability of prototype flash flood events in the Western Mediterranean under uncertainties of the precursor upperlevel disturbance: the HYDROPTIMET case studies, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, 505–525.
- Schmid, W., Schiesser, H.H., y Waldvogel, A. (1992). The kinetic energy of hailfalls: Part IV. Patterns of hailpad and radar data. *J. Appl. Meteorol.* 31, 1165–1178.
- Skaggs, R. H. (1980). The Diurnal Distribution of Large Hail over the United States. *Professional Geographer*, 32, pp. 293–299.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., *et al.*, (2008). A Description of the Advanced Research WRF Version 3, Tech. Note, NCAR/TN-475+STR. National Center for Atmospheric Research, Boulder.
- Skamarock W. C., 2005: Timesplitting techniques for multidimensional transport, disponible en: http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/advect3d_2005.pdf, 26 pp.
- Smart, J.R., y Alberty, R.L. (1985). *The NEXRAD Hail Algorithm Applied to Colorado Thunderstorms*, 14th co@ on Severe Local Storms CAMS), 244-247.
- Waldvogel, A., Federer, B. y Grimm, P. (1979). Criteria for the detection of hail. *J. Appl. Meteor.*, 16, 1521-1525.

- Watanabe, H., Ogura, Y. (1987). Effects of orographically forced upstream lifting on mesoscale heavy precipitation: A case study. *J. Atmos. Sci.*, 44, 661–675.
- Wilson, J.W., Ebert, E.E., Saxen, T.R., Roberts, R.D., Mueller, C.K., Sleigh, M., Pierce, C.E. y Seed, A. (2004). *Sydney 2000 Forecast Demonstration Project: Convective Storm Nowcasting Weather and Forecasting*, 19, 1, pp. 131–150.
- Witt, A., Eilts, M. D., Stumpf, G. J., Johnson, J. T., Mitchell, E. D. W. y Thomas, K. W. (1998). An enhanced hail detection algorithm for the WSR-88D, *Wea. Forecasting*, 13, pp. 286–303.

Capítulo XI

Eventos meteorológicos extremos en la zona metropolitana de Guadalajara, Jalisco

José Francisco León-Cruz¹, Luis Felipe Pineda-Martínez²

¹ Departamento de Geografía Física, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. Dirección electrónica: jleon@igg.unam.mx

² Unidad Académica de Ciencias Sociales, Universidad Autónoma de Zacatecas.

Resumen

La Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) se considera la segunda más poblada a nivel nacional, con poco más de 4.8 millones de habitantes distribuidos en seis municipios centrales y cuatro municipios exteriores. Dicha zona se ubica al occidente de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), región orográficamente compleja que se extiende desde la costa del Golfo de México hasta el Océano Pacífico, y donde se ha documentado gran variedad de eventos meteorológicos extremos como: tornados, granizadas, y tormentas locales severas. En el presente trabajo de investigación se analizan las condiciones meteorológicas sinópticas y de mesoescala en la formación de la tormenta severa y granizada del 30 de junio de 2019, y el tornado de 18 de julio de 2020; un par de eventos extremos que causaron afectaciones significativas en algunos puntos de la ZMG. Empleando datos de reanálisis de ERA5 y NCEP/NCAR, productos satelitales de GOES y observaciones de estaciones meteorológicas automáticas, se expone el panorama general de las condiciones ambientales presentes antes y durante los eventos extremos, y se discute el impacto que estas amenazas naturales representan para la población del estado de Jalisco. Finalmente, se señalan algunos aspectos relacionados con la gestión del riesgo de desastre y el uso de modelos de riesgo para la determinación de escenarios.

Introducción

En meteorología, el término de tiempo severo se refiere a la formación de tormentas intensas y fenómenos relacionados, como granizadas, ráfagas descendentes, y tornados. Dichos eventos poseen un alto potencial de peligrosidad asociado, en

gran medida, a su rápido desarrollo y limitada capacidad de predicción y monitoreo (León-Cruz *et al.*, 2019). Este tipo de amenazas naturales se diferencian de otras de origen hidrometeorológico (p. ej. los ciclones tropicales), porque producen daños lineales o dentro de un perímetro reducido (de 1–2 km) (García-Concepción *et al.*, 2007). Sin embargo, éstas resultan de especial interés en la meteorología operativa, puesto que representan a las manifestaciones del tiempo más violentas y peligrosas.

Los fenómenos meteorológicos relacionados, como granizadas y tornados, resultan de la interacción de sistemas de escala sinóptica y de las condiciones locales como forzamientos orográficos. Si bien alrededor del mundo se han encontrado algunos elementos necesarios para su formación; p. ej. ambientes ricos en energía potencial disponible para la convección (CAPE, por sus siglas en inglés) y cizalladura vertical del viento (Gensini & Ashley, 2011; Romero *et al.*, 2007; Taszarek *et al.*, 2018), en México, estos fenómenos no han sido suficientemente estudiados. Tal situación ha resultado en un desconocimiento general de la amenaza natural a nivel local, y, por ende, en limitantes para la generación de protocolos de monitoreo y el pronóstico oportuno.

En este sentido, y según el último resumen ejecutivo sobre el Impacto Socioeconómico de los Desastres (ISD), los fenómenos de origen hidrometeorológico se asocian al 84.4% del total de los daños y pérdidas totales reportados en el país (CENAPRED, 2019). En el estado de Jalisco, el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) emitió durante el periodo comprendido entre el año 2000–2020, un total de 53 declaratorias, de las cuales la mayoría se localiza en los municipios costeros y estuvieron relacionadas al paso e impacto de ciclones tropicales (CENAPRED, 2020). De la misma manera, la base de datos sobre del ISD señala que, en Jalisco, en el periodo entre 2000–2015, se registraron un total de 98 eventos desastrosos de origen hidrometeorológico, donde el mayor porcentaje se asoció a las lluvias extremas, y tan sólo se listan cuatro eventos de tormentas severas. Este breve análisis muestra la evidente subestimación de los fenómenos asociados al tiempo severo, derivado, en gran medida, del tipo de afectaciones puntuales que presentan.

La Zona Metropolitana de Guadalajara (ZMG) se ubica entre los 20.43°N – 20.81°N y los 103.52°O – 103.00°O. Cubre una superficie de 3,560.6 km² y está compuesta por seis municipios interiores: Guadalajara, El Salto, Tlajomulco de Zúñiga, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá y Zapopan, y cuatro municipios exteriores: Acatlán de Juárez, Juanacatlán, Zapotlanejo e Ixtlahuacán de los Membrillos (SEDATU *et al.*, 2018). Dentro de la ZMG se localizan un total de 64 localidades urbanas y rurales. En el año 2015 contaba una población de 4,887 383 habitantes, una tasa de crecimiento anual de 1.6 entre 2010–2015 y una densidad media ur-

vana de 123.4 hab/ha (SEDATU *et al.*, 2018). Dichas características le confieren a la ZMG el segundo lugar nacional en grado de importancia, sólo por detrás de la Zona Metropolitana del Valle de México.

Geográficamente, la ZMG se localiza al oeste de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), región orográficamente compleja donde se ha documentado un porcentaje importante de tornados en México (León-Cruz *et al.*, 2019). Asimismo, en dicha región se han observado una cantidad significativa de tormentas eléctricas locales severas (TELS), principalmente entre junio y agosto, en horarios vespertinos y nocturnos en partes similares (García-Concepción *et al.*, 2007). Estudios previos señalan la importancia del análisis de las componentes de vulnerabilidad y resiliencia urbana de la ZMG ante el cambio climático y su impacto en la generación de eventos extremos (Bertoux & González Romero, 2015). Así, la ZMG es una región propensa a eventos extremos, densamente poblada, donde resulta evidente que el análisis de fenómenos extremos es un quehacer necesario para la comprensión de la génesis de los mismos, y, por ende, para la reducción de la incertidumbre al momento de generar sistemas de alerta y protocolos de emergencia.

En este contexto, el presente capítulo explora dos eventos meteorológicos extremos recientes en la ZMG: la tormenta severa e intensa granizada del 30 de junio de 2019; y el tornado del 18 de julio de 2020. Los casos se seleccionaron en función del impacto social que causaron y por representar dos escenarios meteorológicos distintos. Se analizan, a través de datos de reanálisis, productos satelitales y observaciones de estaciones meteorológicas automáticas, las condiciones ambientales bajo las cuales se presentaron tales fenómenos naturales. El objetivo primordial de este capítulo fue identificar las características del tiempo severo en la ZMG, y relacionarlos con conceptos sobre la gestión del riesgo de desastres y determinación de escenarios de riesgo.

Metodología

Para el análisis sinóptico se eligieron los datos de reanálisis de ERA5 (Hersbach *et al.*, 2020) del Centro Europeo de Pronósticos Meteorológicos a Mediano Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés) y el reanálisis NCEP/NCAR de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés) (Kalnay *et al.*, 1996). Los datos ERA5 tienen una resolución espacial de 0.25° y una resolución temporal de 60 minutos. Se utilizaron cuatro diferentes niveles de presión: 900-hPa, 850-hPa, 700-hPa, 500-hPa de temperatura y humedad, y se calcularon los índices adimensionales de inestabilidad Total de Totales (TTI) (Tudurí & Ramis, 1997) y Gálvez-Davison (GDI) (Galvez & Davison, 2015). De los datos NCEP/NCAR se utilizaron las anomalías compuestas de la

altura geopotencial a 250-hPa y 500-hPa. Las mallas cuentan con una resolución espacial 2.5° y representan las diferencias con respecto a la climatología a largo plazo de 1981 a 2010. Para ambos tipos de datos se seleccionó un dominio que cubre de los 0°N a los 50°N, y de los 130°O a los 70°O.

Asimismo, se utilizaron observaciones de Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMA's) a cargo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2020). Las estaciones fueron seleccionadas dada su cercanía con la ZMG y corresponden a: Guadalajara (GDL) y Tlajomulco (TLA). Se emplearon datos con una frecuencia de actualización de cada diez minutos de las variables de humedad relativa (%), temperatura del aire (°C), presión atmosférica (hPa) y radiación solar (W/m²). Las estaciones se sometieron a un proceso de validación y homogenización. Las observaciones en superficie se complementaron con los datos de radiosondeos disponibles a través de la Universidad de Wyoming de los Estados Unidos (UW, 2020).

Finalmente, se extrajeron datos del Satélite Geoestacionario Operacional Ambiental 16 (GOES-16, por sus siglas en inglés) para el análisis de los sistemas convectivos. Se empleó el parámetro de temperatura al de tope de la nube, que se deriva de la serie de productos del *Advanced Baseline Imager* (ABI) de nivel 2 (L2). Estos datos cuentan con una frecuencia de muestreo de aproximadamente 5 minutos y forman parte de la serie de productos GOES disponibles de manera gratuita a través de la NOAA (2020). La totalidad de los datos fueron procesados a través de *software* libre: Quantum GIS, Veusz y NCAR Command Language.

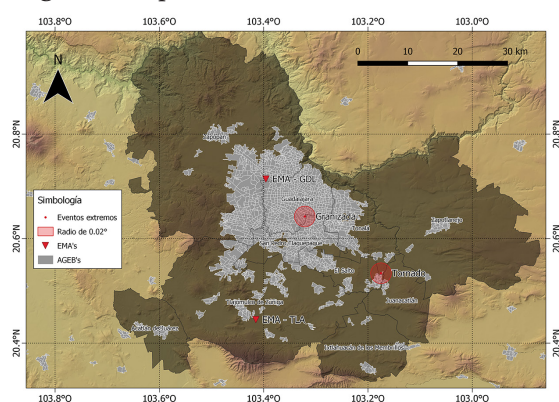
Resultados y discusión

Basados en los reportes de Protección Civil (expuestos por la Secretaría de Gobernación y el Gobierno del Estado de Jalisco), la tormenta severa y granizada se presentó la madrugada del domingo 30 de junio de 2019 cerca de la 01:30 hora local (06:30 UTC). Las colonias afectadas fueron Álamo Industrial, Atlas, El Rosario, Rancho Blanco y San Carlos en el municipio de Guadalajara; y Álamo Oriente, Álamos, Capacha, El Tapatío, El Vergel, Fraccionamiento Revolución, Rancho Blanco y Centro en el municipio de San Pedro Tlaquepaque (figura 1) (SEGOB, 2019a; GEJ, 2019). Se reportaron un total de 457 viviendas afectadas y alrededor de 80 automóviles averiados. Según los informes, la acumulación de granizo, en buena parte asociada al arrastre posterior a su caída, alcanzó más de un metro de altura. El gobierno del estado solicitó la emisión de Declaratoria de Emergencia para los municipios mencionados, misma que fue otorgada el 11 de julio del mismo año (SEGOB, 2019b).

Por otro lado, el evento de tornado se documentó el día 18 de julio de 2020. De acuerdo con los reportes recopilados (basados en las redes sociales oficiales

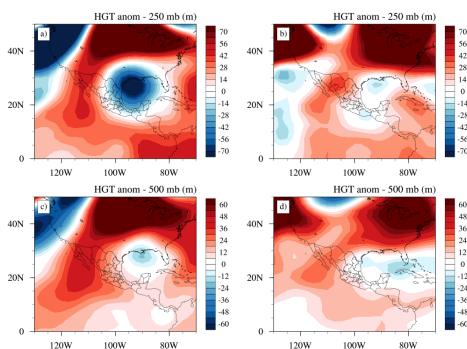
de Protección Civil y Bomberos Jalisco y reportes periodísticos) este tornado se originó por la tarde, cerca de las 18:50 hora local (23:50 UTC). La zona afectada fue el Ejido Los Laureles, en el municipio de El Salto (figura 1). Una vivienda y tres ranchos fueron dañados, y se reportó una persona lesionada. Según los datos recopilados, el tornado tuvo un recorrido de alrededor de 600 metros en dirección suroeste-noreste, una duración cercana a los 15 minutos y un vórtice cuyo diámetro oscilaba entre los 25 y 30 metros (PC Jalisco, 2020; El Occidental, 2020). De acuerdo con los daños observados el tornado se clasificó como EF1 en la Escala Fujita Mejorada, lo que significa vientos máximos entre 138 – 178 km/h.

Figura 1. Mapa de ubicación de la zona de estudio



Fuente: elaboración propia.

Figura 2. Anomalías compuestas (1980 – 2010) de altura geopotencial (m) a 250-hPa y 500-hPa válidas para el 29 de junio de 2019 (a, c) y el 18 de julio de 2020 (b, d)

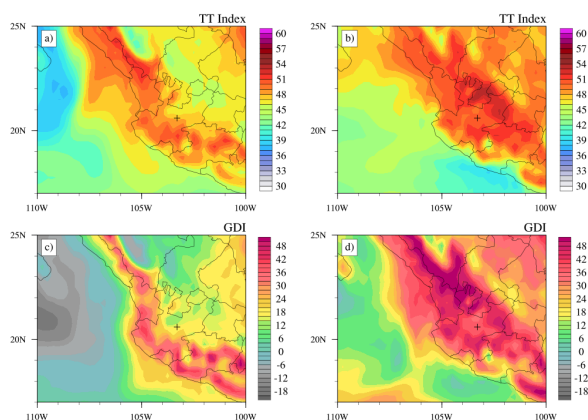


Fuente: elaboración propia con base en datos de reanálisis NCEP/NCAR.

La situación sinóptica para cada evento se muestra en la Figura 2. Las anomalías compuestas de altura geopotencial (HGT), derivadas de los datos de reanálisis de NCEP/NCAR a 250-hPa y 500-hPa, muestran dos escenarios ligeramente distintos. Para el caso de la intensa granizada, se muestra a los 250-hPa una intensa anomalía negativa, lo que se interpreta como un vórtice de núcleo frío. La circulación asociada a dicho sistema favoreció el arrastre del aire frío y de capas superiores desde el noreste hacia la costa central del Océano Pacífico, sobre la región del estado de Jalisco. En niveles medios el vórtice es aún visible, lo que muestra la penetración del aire frío desde los niveles superiores. Esta situación favoreció la disminución de la altura del nivel de congelación, lo que sugiere la formación de granizo.

Para el caso del tornado se observan dos anomalías negativas menos intensas, una sobre el norte del Golfo de México, y otra más sobre el estado de Oaxaca. La configuración de tales sistemas favoreció a la generación de regiones de divergencia en gran parte de la costa occidental de México. A niveles medios, la anomalía positiva de altura geopotencial, que se desprende desde su centro en la costa del noreste de los Estados Unidos, ayuda a la formación de regiones de divergencia, mismas intensifican la aceleración vertical del campo de viento. Si a esto se le suma el arrastre de humedad desde el Océano Pacífico, se produce un ambiente favorable para la generación de tormentas convectivas. Si bien las anomalías de HGT apuntan a la redirección de flujos y el arrastre de humedad, puede mencionarse que este tipo de escenarios es mucho más común que un vórtice de núcleo en el nivel superior de la atmósfera, particularmente en el verano.

Figura 3. Índice Total de Totales (TTI) e Índice Gálvez-Davison (GDI), válidos para el 29 de junio de 2019 (a, c) y el 18 de julio de 2020 (b, d)

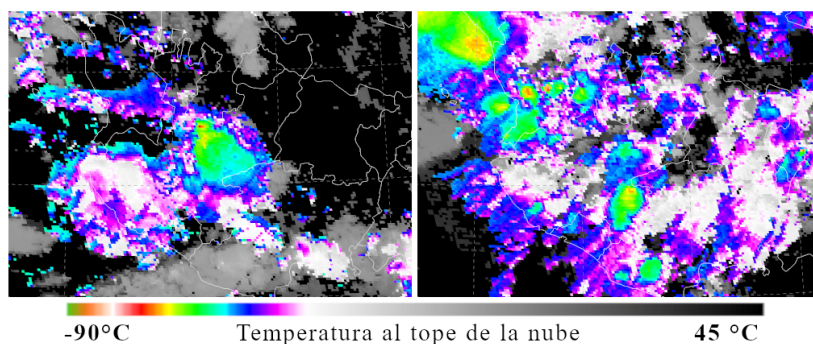


Fuente: elaboración propia con base en datos de reanálisis ERA5.

La situación sinóptica se complementa con el cálculo de dos índices de inestabilidad obtenidos a partir de diferencias térmicas y razones de mezcla entre distintos niveles de la atmósfera (figura 3). Los resultados muestran que en ambos casos las condiciones ambientales favorecían la formación de tormentas convectivas. Los valores obtenidos del índice TTI, para los casos de estudio, son de 48 (para el día de la granizada) y 51 (para el día del tornado). Tales valores sugieren un alto potencial de formación tormentas, y de posibilidad del desarrollo de eventos severos. Por otro lado, los valores calculados para el GDI fueron de 20 para el día de la granizada, y de 40 para el caso del tornado. Estos valores indican un alto potencial de convección superficial de aislada a dispersa y algunas tormentas eléctricas aisladas para el primer caso; y potencial de tormentas eléctricas dispersas y/o convección superficial generalizada para el segundo.

Las condiciones termodinámicas de la atmósfera que se pueden extraer de los índices de inestabilidad sugieren un ambiente más inestable y generalizado para el caso del tornado. No obstante, el aire frío de las capas superiores en el caso de la granizada fue determinante para el impacto que tuvo este evento en particular. Estas afirmaciones son respaldadas por las observaciones en altura de las radiosondas. En este sentido, para el caso de la granizada (radiosondeo del 30 de junio de 2019 a las 00:00 UTC) se observó que el nivel de congelación se ubicaba cerca de los 3,000 metros sobre la superficie, valor indicativo de alta probabilidad de granizo; mientras que, para el caso del tornado (radiosondeo del 19 de julio de 2020 a las 00:00 UTC), se detectaron valores de CAPE superiores a los 1800 J/kg, cizalladura de alrededor de 3 m/s y una tasa de lapso de 6.1 °C/km.

Figura 4. Temperatura al tope de la nube (°C) del satélite GOES-16 a la hora aproximada de la granizada del 30 de junio de 2019 (a) y el tornado del 18 de julio de 2020 (b)



Fuente: elaboración propia con base en los productos de nube de GOES-16.

Los productos de nivel 2 del satélite GOES-16 (temperatura al tope de la nube °C), se muestran en la Figura 4. La imagen representa la observación más próxima a la hora estimada de cada uno de los eventos. Para el caso de la granizada del 30 de junio de 2019 se muestra un extenso núcleo de tormenta sobre la región de estudio. Las temperaturas detectadas oscilan alrededor de -65°C con regiones de hasta -80°C, lo que es indicador de nubes de crecimiento vertical como los cumulonimbos. El núcleo de tormenta se encontraba en fase madura, por lo que la presencia de ráfagas de viento, granizo e intensas precipitaciones era probable. La extensión máxima del sistema de tormenta fue de ~117 km en dirección noreste-sureste. Este sistema se desarrolló por la noche, y es coincidente con la climatología de TELS en la ZMG (García-Concepción *et al.*, 2007).

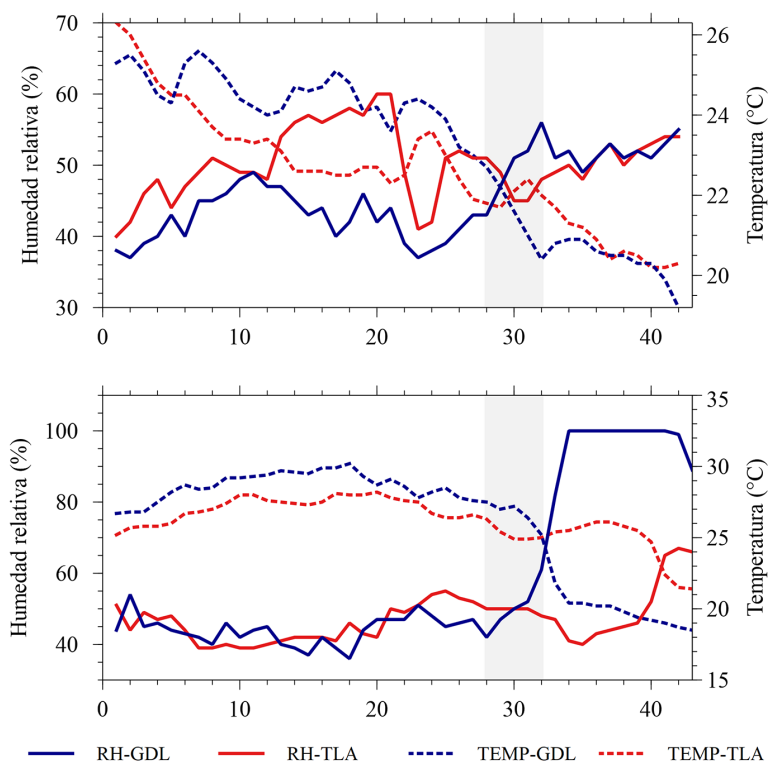
Para el caso del tornado del 18 de julio de 2020 se observa un panorama distinto. En este evento se identifica un pequeño núcleo de tormenta de ~45 km de extensión y en fase de desarrollo. Dicho sistema se encuentra alineado con otros núcleos en desarrollo a lo largo de las regiones montañosas colindantes de la Sierra Madre Occidental y la FVTM. La temperatura al tope de la nube oscila alrededor de los -50°C (algunos grados por encima que el caso de la granizada), lo que también es indicador de nubes de crecimiento vertical. Es importante mencionar que casos similares han sido documentados previamente en el estado de Jalisco, también asociados a la formación de tornados (León-Cruz *et al.*, 2019).

Para el análisis de datos de estaciones meteorológicas, se tomaron como referencia las dos instalaciones más cercanas a los eventos. Tales estaciones no fueron capaces de registrar a los fenómenos en sus observaciones, sin embargo, se muestran las características del entorno cercano y resultan útiles para establecer las condiciones ambientales previas a la formación del tornado y la intensa granizada. Los datos de las EMA seleccionadas pueden verse en la Figura 5. Para el caso de la intensa granizada del 2019 se observa un claro decremento de la temperatura en ambas estaciones, en los minutos previos y durante la ventana de tiempo en donde se ubica la tormenta severa, mientras que la humedad relativa incrementa considerablemente. Dicho comportamiento está asociado a la condensación del vapor de agua y liberación de calor latente. Una situación interesante es que aproximadamente 40 minutos previos a la granizada se registró un decaimiento de la humedad relativa, misma que podría asociarse al flujo de salida de la tormenta, representado por el aire frío y seco de capas superiores.

Para el evento del tornado en el 2020, la estación de Guadalajara (GDL) muestra un claro decaimiento de la temperatura y el aumento de la humedad relativa en la ventana de tiempo donde se documentó el fenómeno. Tales características se relacionan con la liberación de calor latente y la precipitación, que es evidente al marcar el 100% de humedad. La estación de Tlajomulco muestra

un comportamiento similar, pero con un retraso de aproximadamente una hora y media, lo que podría asociarse o bien la formación de otro núcleo o la advección del ya existente. El caso del tornado es una muestra de la formación de tormentas vespertinas en el verano para esta región del país, donde el calentamiento diurno (no se muestra) y los forzamientos orográficos (García-Concepción *et al.*, 2007; León-Cruz *et al.*, 2019) son dos de los principales factores de involucrados en la generación de ese tipo de tormentas.

Figura 5. Series de tiempo de humedad relativa (%) y temperatura (°C) de las EMA de Guadalajara (GDL) y Tlajomulco (TLA), válidas del 29/06/2019 a las 01:30 UTC al 29/06/2019 a las 08:30 UTC (cuadro superior) y del 18/07/2020 a las 18:50 UTC al 19/07/2020 a las 01:50 UTC (cuadro inferior). El área sombreada en gris indica una ventana temporal de 40 minutos centrada en la hora del evento



Fuente: elaboración propia con base en los datos de las EMA del SMN.

Conclusiones

El tiempo severo representa un peligro inminente para la sociedad mexicana. Fenómenos naturales asociados, como granizadas y tornados, son de especial interés por la cantidad de daños que pueden producir en un corto periodo de tiempo. La ZMG es la segunda región más densamente poblada en México, y es una zona donde este tipo de eventos ocurren frecuentemente. Si la amenaza natural se conjuga con una alta vulnerabilidad, el riesgo de desastre se incrementa considerablemente. Aunado a ello, la limitada capacidad para el monitoreo y pronóstico a muy corto plazo de estos fenómenos naturales se presenta como un elemento crítico para la toma de decisiones en el momento de la emergencia.

El presente trabajo analiza las condiciones meteorológicas bajo las cuales dos eventos extremos se desarrollaron en la ZMG en 2019 y 2020. Los resultados muestran dos panoramas distintos. Por un lado, la tormenta severa y posterior granizada mostró características de un sistema organizado y derivado de un vórtice de núcleo frío en niveles altos interactuando con la advección de humedad del Pacífico y condiciones de divergencia en niveles medios de la atmósfera. La energía necesaria para la formación de la tormenta se originó por el calentamiento diurno, lo que derivó en la formación de un sistema convectivo nocturno. El aire frío de la atmósfera superior provocó la formación de grandes cantidades de granizo que se precipitaron en un corto periodo de tiempo, lo que originó la acumulación por arrastre en algunas de las principales avenidas de la ZMG.

Para el caso del tornado, la evidencia sugiere que se trató un evento de tipo no-supercelda, es decir, un tornado menor. Éste surgió derivado de las condiciones de inestabilidad típicas del verano: advección de humedad del Océano Pacífico, condiciones de divergencia en niveles medios y altos de la atmósfera y el calentamiento diurno. El tornado se originó en la etapa de formación del sistema de tormenta, probablemente debajo de una torre-cúmulo o *cumulus-congestus*. Las condiciones de inestabilidad derivadas de las diferencias térmicas y las razones de mezcla son visiblemente captadas por los índices GDI y TTI calculados a partir de los datos de reanálisis y las observaciones en altura del radiosondeo, y coinciden con la formación de tormentas a lo largo de los gradientes topográficos de la Sierra Madre Occidental y la Faja Volcánica Transmexicana.

El análisis de estos dos eventos extremos demuestra que las condiciones necesarias para la formación de tiempo severo en esta región del país pueden variar considerablemente, a pesar de que este se desarrolle bajo condiciones estacionales similares. El estudio de las condiciones meteorológicas es necesario para comprender la verdadera naturaleza del tiempo severo en el país. Este es un primer paso para la posterior aplicación de dichos conocimientos en la construcción de escenarios potencialmente peligrosos.

Referencias bibliográficas

- Bertoux, L., & González Romero, D. (2015). Vulnerabilidad y resiliencia urbana frente al cambio climático: El caso de la zona metropolitana de Guadalajara, México. *Urbano*, 18(31), 24–31.
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (2019). Impacto socioeconómico de los principales desastres: resumen ejecutivo 2018. Disponible en: <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/409-RESUMENEJECUTIVOIMPACTO2018.PDF>
- Centro Nacional de Prevención de Desastres (2020). Sistema de Consulta de Declaratorias. Disponible en: <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/>
- El Occidental (2020). Tornado en el Salto, Jalisco, sí dejó daños en una casa y un rancho. Disponible en: <https://www.eloccidental.com.mx/policiaca/tornado-en-el-salto-jalisco-si-dejo-danos-en-una-casa-y-un-rancho-5519417.html>
- Galvez, J. M., & Davison, M. (2015). The Gálvez-Davison Index for Tropical Convection. 1–23. Disponible en: http://www.wpc.ncep.noaa.gov/international/gdi/GDI_Manuscript_V20150910.pdf
- García-Concepción, O., Ramírez-Sánchez, H. U., Alcalá-Gutiérrez, J., Meunert-Peña, Á., & García-Guadalupe, M. E. (2007). Climatología de las tormentas eléctricas locales severas (TELS) en la Zona Metropolitana de Guadalajara. *Investigaciones Geográficas*, 63, 7–16.
- Gensini, V. A., & Ashley, W. S. (2011). Climatology of Potentially Severe Convective Environments from the North American Regional Reanalysis. *Electronic Journal of Severe Storms Meteorology*, 6(8), 1–40.
- Gobierno del Estado de Jalisco (2019). Atiende Protección Civil Jalisco emergencia por granizada en Guadalajara. Nota de prensa oficial. Disponible en: <https://www.jalisco.gob.mx/es/prensa/noticias/90446>
- 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., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., ... Thépaut, J. N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730), 1999–2049.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., & Woollen, J. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–472.
- León-Cruz, J. F., Carbajal, N., & Pineda-Martínez, L. F. (2019). The role of complex terrain in the generation of tornadoes in the west of Mexico. *Natural Hazards*, 97(1), 335–353.

- NOAA, N. O. and A. A. (2020). GOES-R Series Satellites | National Centers for Environmental Information (NCEI) formerly known as National Climatic Data Center (NCDC). Disponible en: <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/satellite-data/goes-r-series-satellites#ACHT>
- Protección Civil Jalisco (2020). #Alinstante acuden oficiales de la Comandancia Central, al municipio de El Salto, reportan presencia de un tornado, se acude a verificar posibles daños. Ceda el paso a las unidades de emergencia. Disponible en: <https://twitter.com/PCJalisco/status/1284651208725032961>
- Romero, R., Gayà, M., & Doswell, C. A. (2007). European climatology of severe convective storm environmental parameters: A test for significant tornado events. *Atmospheric Research*, 83(2-4 SPEC. ISS.), 389–404.
- Secretaría de Desarrollo Urbano, Territorial y Agrario, Consejo Nacional de Población, Instituto de Estadística y Geografía (2018). Delimitación de las zonas metropolitanas de México 2015. Disponible en: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/305634/Delimitacion_Zonas_Metropolitanas_2015.pdf
- Secretaría de Gobernación (2019). Proposición con punto de acuerdo por el que se exhorta a la secretaría de seguridad y protección ciudadana para que formule la declaratoria de zona de desastre natural en los municipios de San Pedro Tlaquepaque y Guadalajara, en el estado de Jalisco. Disponible en: http://sil.gobernacion.gob.mx/Archivos/Documentos/2019/07/asun_3885834_20190703_1562178671.pdf
- SEGOB, S. de G. (2019). Declaratoria de emergencia. DOF - Diario Oficial de La Federación. http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5565444&fecha=11/07/2019
- Servicio Meteorológico Nacional (2020). Estaciones Meteorológicas Automáticas (EMAs). Disponible en: <https://smn.conagua.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s>
- Taszarek, M., Brooks, H. E., Czernecki, B., Szuster, P., & Fortuniak, K. (2018). Climatological aspects of convective parameters over Europe: A comparison of ERA-interim and sounding data. *Journal of Climate*, 31(11), 4281–4308.
- Tudurí, E., & Ramis, C. (1997). The environments of significant convective events in the western Mediterranean. *Weather and Forecasting*, 12(2), 294–306.
- Wyoming University (2020). Atmospheric Soundings. Department of Atmospheric Science. Disponible en: <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>

Capítulo XII

Análisis histórico (1851-2019) de huracanes extremos en Quintana Roo, México

*Gabriel Sánchez-Rivera*¹, *Oscar Frausto-Martínez*¹, *Adrián Cervantes-Martínez*¹

¹ División de Desarrollo Sustentable, Universidad de Quintana Roo; Avenida Andrés Quintana Roo, S/N, frente a colonia San Gervasio, Cozumel, Quintana Roo, 77600, México. Dirección electrónica: grivera@uqroo.edu.mx.

Resumen

Quintana Roo, uno de los tres estados que integran la península de Yucatán, sobresale por tener la mayor captación de divisas provenientes de la actividad turística, al tiempo que recibe la mayor cantidad de impactos directos de ciclones tropicales provenientes del mar Caribe. A pesar de la cantidad de estudios en la literatura científica, no se identifica información que aborde la caracterización de la actividad ciclónica en la región desde la perspectiva de la rareza de su ocurrencia, en términos de la intensidad de la velocidad de los vientos máximos sostenidos y mínima presión atmosférica. Los estudios encontrados se centran en la clasificación de los eventos en función de la escala Saffir-Simpson. El objetivo del estudio consistió en el reconocimiento de los ciclones que impactaron tierras peninsulares, en particular el estado de Quintana Roo, a partir del análisis de datos históricos comprendido entre 1851 y 2019. Los resultados obtenidos destacan que, en el período estudiado, se presentaron cuatro huracanes cuyos vientos máximos sostenidos y mínima presión atmosférica superan los umbrales extremos de 0.1 y 99.9 percentiles, de los cuales, los huracanes *Gilbert* (1988) y *Wilma* (2005) provocaron las mayores afectaciones en las ciudades de Cozumel, Playa del Carmen y Cancún, localizadas en el sector nororiental de la península. La caracterización de eventos en categoría de extremos (muy raros y extremadamente raros) resulta de vital importancia para conocer las capacidades de resiliencia y vulnerabilidad de los sistemas socioambientales, la infraestructura y medios de producción de los cuales depende la población de la región.

Palabras clave: *ciclones tropicales, eventos extremos, umbrales, vientos máximos, presión atmosférica, península de Yucatán.*

Introducción

La península de Yucatán (PY) está sujeta al impacto recurrente de ciclones tropicales, siendo el estado de Quintana Roo (Q.Roo.) el que recibe el primer contacto de los fenómenos que ingresan a territorio nacional provenientes del Mar Caribe, por lo que, de acuerdo con Palacio-Aponte (1998) e Ihl y Frausto Martínez (2014), las zonas costeras del sector nororiental de la península son consideradas como áreas de “peligro extremo” dada la alta probabilidad de impacto. Siendo estos eventos naturales, como ningún otro, los que provocan las mayores afectaciones en la península.

De acuerdo con los registros de la base de datos conocida como “mejor trayectoria” o “*International Best Track Archive for Climate Stewardship* (IBTrACS, 2019a)”, para la Cuenca del Atlántico Norte (CAN), en el período 1851-2019, se registran un total de 2,220 ciclones, de los cuales 164 (7%) han impactado la península de Yucatán.

A partir de lo anterior se formularon las siguientes preguntas de investigación: *a)* ¿se ha presentado un aumento en la cantidad e intensidad de ciclones que han impactado la PY y el estado de Q. Roo., en el período 1851-2019?; *b)* ¿Cuáles de los ciclones que impactaron la PY y el estado de Q. Roo. destacan por su intensidad en términos de la velocidad máxima de vientos sostenidos y mínima presión atmosférica? y, *c)* ¿cuáles de los huracanes se pueden considerar extremos?

Para responder las preguntas se aborda el reconocimiento de los eventos extremos considerados como “raros”, “muy raros” y “extremadamente raros” desde la perspectiva de la Organización Mundial Meteorológica (WMO, 2018), analizando los eventos ciclónicos que impactaron la península en un período de 168 años.

Ciclones tropicales

El Centro Nacional de Huracanes (NHC) define a los ciclones tropicales como fenómenos hidrometeorológicos representados por “una circulación atmosférica cerrada que gira en sentido contrario a las manecillas del reloj en el hemisferio norte y en sentido horario en el hemisferio sur” (NHC, 2019).

La temporada de huracanes en la CAN se presenta anualmente entre el 1 de junio y el 30 de noviembre. De acuerdo con Knapp *et al.* (2018), el Atlántico Norte ocupó el tercer lugar en actividad ciclónica entre los años 1940 y 2010, por debajo del Pacífico Oeste y Este.

Autores como Holland y Bruyère (2014); Doval, Pérez, Acosta, y Rodríguez (2013) y Vecchi y Knutson (2008) han realizado estudios tendientes a identificar patrones que permitan explicar la dinámica con relación a la ocurrencia de ciclo-

nes tropicales mediante la correlación de variables como son: temperatura de la superficie oceánica, actividad de las manchas solares, Oscilación del Sur (ENOS) y la oscilación multidecadal del océano Atlántico (AMO).

Por su parte, Lazos-Chavero, Mwampamba y García-Frapolli (2018) plantean que los escenarios del cambio climático prevén un aumento en la cantidad e intensidad de ciclones, incremento que se espera se presente de manera paulatina, por lo que para observarlos se requiere del análisis de largas series de tiempo y el reconocimiento de eventos con características singulares.

Eventos extremos

La complejidad para la identificación de eventos perturbadores en categoría de extremos se debe a que no existe un consenso en cuanto a su definición; sin embargo, Stephenson (2008) propone que los ciclones en categoría de extremo, serían aquellos cuya ocurrencia es “rara”, con efectos “severos” y “graves”, donde “raro” queda definido como aquellos eventos con baja probabilidad de suceder. La WMO (2018) plantea que los eventos considerados como “raros”, son los que superan los percentiles 90 y 95, mientras que los considerados como “muy raros” excederían los umbrales < 1 y > 99 o superiores (inferiores según el caso). Décamps (2008) señala que eventos extremos son aquellos sucesos que exceden algún tipo de límite en términos de magnitud, duración y frecuencia.

Para la caracterización de eventos extremos en calidad de “raros”, “muy raros” o “extremadamente raros” existen diversas técnicas y modelos, entre los que destacan los identificados por Stephenson (2008) y Camuffo *et al.* (2018): *a)* Pico por encima del umbral; *b)* Teoría del valor extremo; *c)* Excedente a un umbral relativo; *d)* Excedente a un umbral y un período de retorno; y *e)* Efectividad: eventos que desencadenan un desastre o emergencia y que pueden ocasionar la pérdida de vidas, lesiones, etc.

El estudio y caracterización de estos fenómenos puede ser abordado considerando diversas variables físicas y temporales como son: la intensidad del meteor, medida en función de la velocidad máxima de vientos sostenidos y la mínima presión atmosférica, trayectoria (localización), duración (permanencia), velocidad y distancia del recorrido, entre otras (IBTrACS, 2019b). Sin embargo, la variable mayormente considerada corresponde a la velocidad media de los vientos máximos sostenidos, con la cual se desarrolló la escala de intensidad (magnitud) y capacidad de destrucción de los ciclones tropicales, conocida como “escala Saffir-Simpson” (Schott *et al.*, 2012).

La escala tiene como objetivo principal servir como una alerta a la población de los posibles tipos de daños e impactos vinculados a la intensidad de los meteoros, para lo cual se establecieron cinco clases, donde cada una de ellas describe la

magnitud de los daños que se podrían esperar en función de la magnitud de cada evento (Schott *et al.*, 2012), convirtiéndola en el principal referente para la caracterización de los eventos ciclónicos (Rosengaus-Moshinsky *et al.*, 2002).

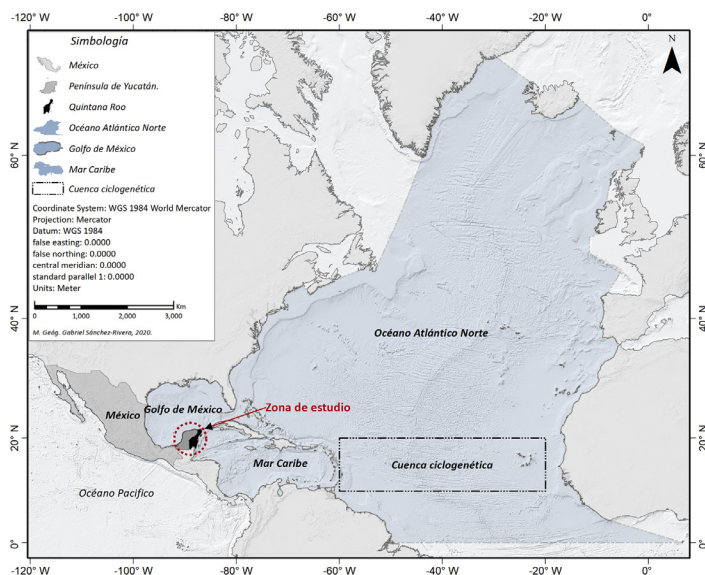
Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio corresponde al estado de Quintana Roo en el extremo oeste de la cuenca del Mar Caribe (figura 1), la cual, de acuerdo con el *Flanders Marine Institute* (2018) representa 5% del total de la superficie de la CAN (59.5 millones de km²). El estado ocupa 2.2% del territorio nacional con una superficie de 43,216.25 Km², y una extensión litoral de 1,176 km que corresponde al 10.5% nacional (SECTUR, 2008). Se caracteriza por estar conformada de una amplia plataforma de origen calizo de escaso relieve (Vidal-Zepeda, 2005).

Los ciclones de mayor intensidad que han impactado la península se han gestado en la región de la cuenca ciclogénica del Atlántico Norte, localizada entre las coordenadas: 10°N-20°N, 20°W-60°W entre las islas de Cabo Verde y las Antillas Menores del Caribe (Saunders & Lea, 2010).

Figura 1: Cuenca del Atlántico Norte



Fuente: elaborado con datos de Amante y Eakins (2009) y Flanders Marine Institute (2018).

Datos

La información sobre las trayectorias y características físicas de los ciclones formados en la CAN se obtuvo de la base de datos del IBTrACS (2019a) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Los registros presentan información relacionada con la latitud, longitud, vientos máximos y mínima presión atmosférica del ciclón, entre otras, en períodos de 6 h.

Los datos corresponden a una representación suavizada de la localización e intensidad de un ciclón tropical a lo largo de su trayectoria, como resultado del análisis posterior a la temporada de ciclones. La información proviene de observaciones superficiales de barcos, aeronaves e imágenes satelitales, por lo que el registro histórico no es homogéneo en su construcción (Kenneth R. Knapp & Kruk, 2010).

Los registros presentan variaciones espacio-temporales de origen, en función de las agencias que las reportan, lo que, de acuerdo con K. R. Knapp *et al.* (2018), se traduce en niveles heterogéneos de incertidumbre por cada evento en particular en función de sus características, como son: año de formación, localización geográfica, intensidad, permanencia, etc.

La información sobre las características de la PY y Q. Roo., se obtuvieron del Marco Geoestadístico Nacional (INEGI, 2019).

Métodos

Para cumplir con los objetivos del estudio se agruparon los procesos en dos fases principales:

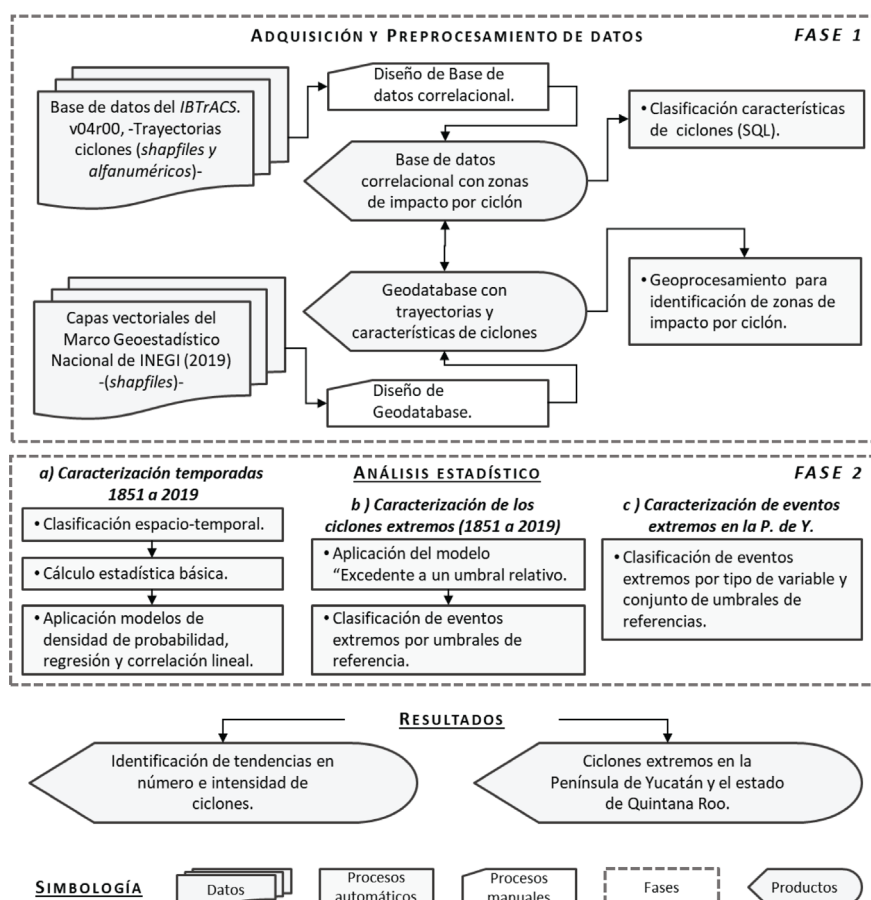
Fase 1: Adquisición y Preprocesamiento de datos. Homologación de capas vectoriales a la proyección cartográfica UTM-GCS_WGS_1984 y conversión de unidades al sistema métrico decimal (según el caso). Diseño de una base de datos correlacional en el programa MS-Access, y una Geodatabase para la generación de consultas e identificación de las trayectorias de los ciclones que impactarán la PY y el estado de Quintana Roo mediante geoprocesamientos en el programa ArcGis 10.3.

Fase 2: Análisis estadístico. Identificación del número e intensidad de eventos ciclónicos a través de consultas en la base de datos correlacional. Clasificación espacio-temporal por décadas y grupos, basados en las categorías Saffir-Simpson: a) depresiones y tormentas tropicales; b) huracanes de baja y mediana intensidad, categorías H1, H2 y H3; y c) ciclones de alta intensidad, categorías H4 y H5. Estimación de variaciones a nivel decadal, mediante el cálculo de tasas de cambio del número de ciclones por década y por grupos de categorías con respecto al total de eventos ocurridos por década. Estimación de la distribución anual del número de

ciclones vs. intensidad y velocidad máxima de vientos sostenidos vs. mínima presión atmosférica, mediante los modelos: regresión lineal (basado en el método de mínimos cuadrados), correlación lineal de *Pearson* y *Spearman*, y función de densidad de probabilidad. Finalmente, el reconocimiento de huracanes en categoría de extremos a través del modelo “excedente a un umbral relativo”, con umbrales de referencia 0.1 y 99.9 percentiles, para los casos considerados “extremadamente raros” y, 1.0 y 99.0 para “muy raros”. Como apoyo para la aplicación de los modelos se utilizó el programa estadístico *Minitab 17*.

El diagrama metodológico general utilizado se muestra en la Figura 2:

Figura 2. Diagrama metodológico



Resultados

Caracterización de las temporadas 1851 a 2019

La base de datos del IBTrACS registra 164 ciclones que impactaron la PY (7% de los formados en la CAN), de los cuales 137 (84%) cruzaron Quintana Roo (tabla 1).

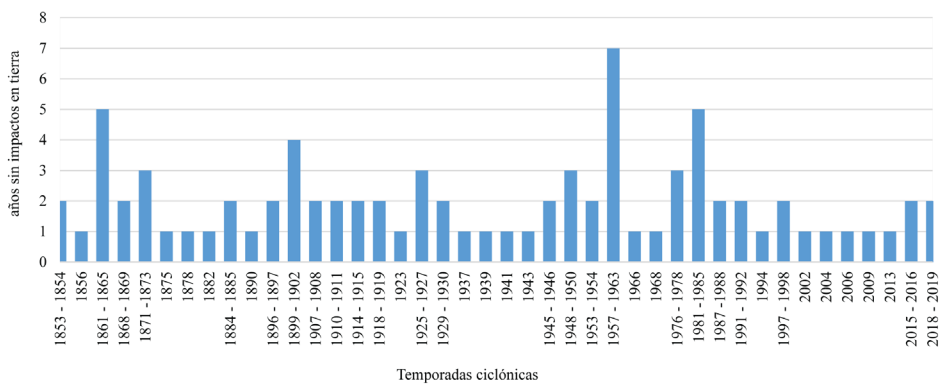
Tabla 1: Ciclones que impactaron Q. Roo. por categoría

En escala Saffir-Simpson (SS)							
DT	TT	H1	H2	H3	H4	H5	Total
30	47	23	31	16	8	9	164

Donde: DT = Depresión Tropical; TT = Tormenta tropical; y H = Huracán categoría 1 a 5.

En los 168 años analizados se identificó que en el 49% (n=82) de las temporadas no se presentaron impactos en el estado, destacándose las temporadas: 1957-1963 con el máximo de 7 años consecutivos, 1861- 1865 y 1981-1985 con 5 años, y 1899-1902 con 4 (figura 3).

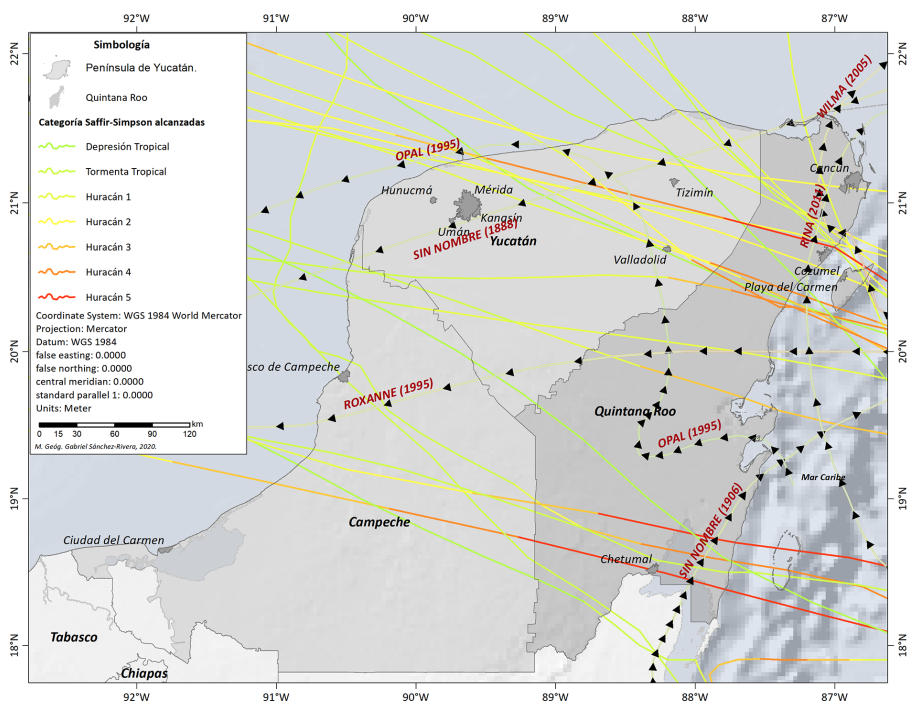
Figura 3: Temporadas ciclónicas sin impactos directos sobre Q. Roo.



La distribución espacial de los impactos en tierra de huracanes intensos, que alcanzaron categorías H3 a H5, se concentra en las zonas norte y sur del estado. De ellos, el 83% (n=25) cruzaron transversalmente, con trayectorias uniformes con rumbo aproximado SE-NO. Del 17% (n=5) restante, los huracanes Sin nombre (1906, H3), Wilma (2005, H5) y Rina (2011, H3) presentaron trayectorias con rumbo SE-NE; Sin nombre (1888, H3) NE-SO y Roxanne (1995, H3) con rumbo E-SO.

La trayectoria más errática corresponde al huracán Opal (1995, H4), el cual realiza un zigzag durante su paso por tierra cruzando el estado por la zona centro (figura 4).

Figura 4. Huracanes que alcanzaron categorías H3 a H5 que impactaron Q. Roo.



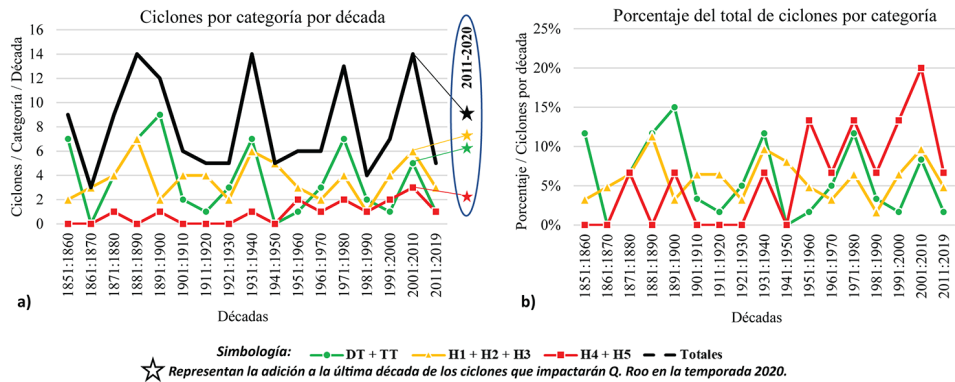
Un primer análisis del comportamiento de la actividad ciclónica a partir del conteo de eventos, agrupados por décadas y categorías Saffir-Simpson, permite observar que no existe una distribución homogénea en la cantidad e intensidad de los ciclones que han tocado tierra; no obstante, a partir de la última década del siglo xx y la primera del presente se aprecia un aumento, con máximos de 3 huracanes intensos en categorías H4 y H5 en cada una de ellas (tabla 2 y figura 5).

Tabla 2. Número de ciclones agrupados por categoría en el período 1851-2019

	Ciclones por categoría				Porcentaje por categoría		
Décadas	DT + TT	H1 + H2 + H3	H4 + H5	Totales	DT + TT	H1 + H2 + H3	H4 + H5
1851:1860	7	2	0	9	12 %	3 %	0 %
1861:1870	0	3	0	3	0 %	5 %	0 %
1871:1880	4	4	1	9	7 %	6 %	7 %
1881:1890	7	7	0	14	12 %	11 %	0 %
1891:1900	9	2	1	12	15 %	3 %	7 %
1901:1910	2	4	0	6	3 %	6 %	0 %
1911:1920	1	4	0	5	2 %	6 %	0 %
1921:1930	3	2	0	5	5 %	3 %	0 %
1931:1940	7	6	1	14	12 %	10 %	7 %
1941:1950	0	5	0	5	0 %	8 %	0 %
1951:1960	1	3	2	6	2 %	5 %	13 %
1961:1970	3	2	1	6	5 %	3 %	7 %
1971:1980	7	4	2	13	12 %	6 %	13 %
1981:1990	2	1	1	4	3 %	2 %	7 %
1991:2000	1	4	2	7	2 %	6 %	13 %
2001:2010	5	6	3	14	8 %	10 %	20 %
2011:2019	1	3	1	5	2 %	5 %	7 %
<i>Totales</i>	60	62	15	137	100 %	100%	100%

Donde: DT = Depresión Tropical; TT = Tormenta tropical; y H = Huracán categorías 1 a 5.

Figura 5. Intensidad de ciclones agrupados por categorías (Saffir-Simpson) por décadas (1851-2019), donde: a) línea color verde, representa la suma de los ciclones en categoría de DT y TT; línea amarilla, suma de los huracanes categorías 1, 2 y 3; línea roja suma de huracanes categorías 4 y 5; y línea negra punteada, suma total de ciclones. b) equivalente a -a-), pero mostrando el porcentaje por década con respecto al total de ciclones reportados en el periodo estudiado



Nota: DT = Depresión Tropical; TT = Tormenta tropical; y H = Huracán categorías 1 a 5.

Fuente: adaptada de Webster (2005), actualizada con datos del IBTrACS (2019a) a septiembre del 2019.
 Datos del 2020 del IBTrACS (2020).

De las 9 ocasiones en que la PY ha sido impactada por ciclones en categoría H5, en 8 (89%) los meteoros cruzaron Q.Roo. (tabla 3). Destaca 2005 por ser el único año en que se presentaron dos ciclones categoría H5 (*Emily* y *Wilma*) y dos H4 (*Katrina* y *Rita*).

Tabla 3. Ciclones que alcanzaron categoría H5 que impactaron Q. Roo. en el periodo 1851-2019

Clave	Año	Nombre	Longitud [km]	Vientos Máx. [km/h]	Mín. Pres [mb]	Influencia estatal		
						Q. Roo.	Yuc.	Camp.
1933259N11302	1933	Sin nombre	365,018.56	259.28	929	*	*	*
1955265N13307	1955	<i>Janet</i>	404,701.00	277.80	914	*		*
1967249N14303	1967	<i>Beulah</i>	779,991.90	259.28	923	*	*	
1971249N11302	1971	<i>Edith</i>	684,475.46	259.28	943	*		*
1988253N12306	1988	<i>Gilbert</i>	823,013.13	296.32	888	*	*	

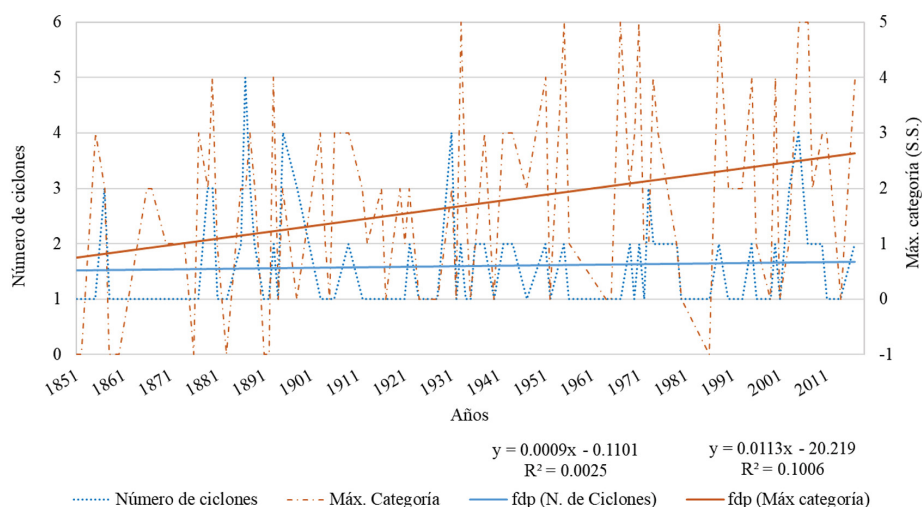
1998295N12284	1998	<i>Mitch</i>	2,372,431.54	287.06	905		*	*
2005289N18282	2005	<i>Wilma</i>	601,455.61	296.32	882	*		
2005192N11318	2005	<i>Emily</i>	588,786.00	259.28	929	*	*	
2007225N12331	2007	<i>Dean</i>	632,435.40	277.80	905	*		*

Donde: *influencia estatal* = estados impactados; *Q. Roo.* = Quintana Roo; *Yuc.* = Yucatán; y *Camp.* = Campeche.

La máxima velocidad de vientos sostenidos reportada es de 296.3 km/h para los huracanes *Gilbert* (1988) y *Wilma* (2005), y la mínima presión de 882 mb del huracán *Wilma* (2005). Ambos sistemas causaron grandes afectaciones a las ciudades de Cancún y Playa del Carmen.

Del cálculo de la función de probabilidad, los valores de R^2 obtenidos indican que la línea de tendencia no se ajusta dada la dispersión de los datos (figura 6), lo que se refuerza al analizar las tasas de cambio, las cuales dan valores de 0.09% para la cantidad de ciclones (incremento prácticamente nulo) y 1.13% para la intensidad, lo que representa un incremento mínimamente significativo.

Figura 6. Distribución anual del número e intensidad (categoría) de ciclones que impactaron la península en el período 1851-2019. Donde: -1 = Depresión tropical; 0 = Tormenta tropical; 1 a 5 huracanes en categorías H1 a H5 en la escala Saffir-Simpson; y fdp = función de densidad de probabilidad

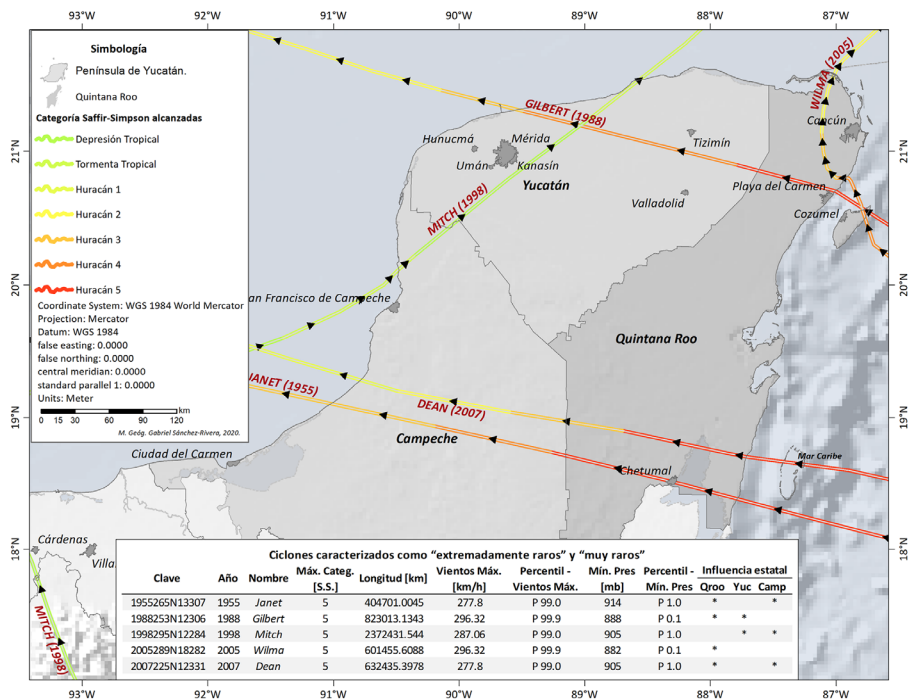


Ciclones categorizados como eventos “muy raros” y “extremadamente raros”.

Los resultados del modelo “Excedente a un umbral relativo”, considerando el total de ciclones formados en la CAN, caracterizan a los huracanes *Gilbert* (1988) y *Wilma* (2005) como “extremadamente raros” y a los huracanes *Janet* (1955), *Mitch* (1998) y *Dean* (2007) como “muy raros”, donde *Mitch* es el único que no cruza Q. Roo. (figura 7).

Con relación a la temporalidad de la ocurrencia de eventos de tales características, se observa que, si bien las diferencias en años entre uno y otro no son equidistantes (33; 10; 7; y 2 años), sí se presenta en el lapso de 52 años una reducción significativa entre el primero reconocido (*Janet*) y el más reciente (*Dean*), ello da indicios del aumento en la frecuencia del impacto en el estado y la PY de ciclones intensos en categoría de eventos extremos.

Figura 7. Trayectorias de los ciclones que impactaron Q. Roo. y la PY caracterizados como “muy raros” y “extremadamente raros”



Temporada 2020

Derivado de la intensa actividad ciclónica registrada en el Atlántico durante la temporada 2020, al cierre oficial de la misma (30 de noviembre), se registró en la península el impacto directo de 4 ciclones: *Amanda-Cristóbal* (TT); *Gamma* (TT); *Delta* (H4) y *Zeta* (H2), hecho que no había vuelto a ocurrir desde el año 2005 cuando 4 ciclones ingresaron a la PY. Con excepción de *Cristóbal*, los 3 ciclones restantes ingresaron por la zona noreste de Quintana Roo, con trayectorias uniformes con rumbo aproximado SE-NO.

El huracán *Zeta* fue el que alcanzó la mayor intensidad, registrando vientos máximos sostenidos del orden de 222.24 km/h y mínima presión atmosférica de 953 mb, lo que lo ubicaría en la categoría de evento extremo considerado como “raro” al exceder el umbral del percentil 90.

Discusión y conclusiones

Los hallazgos no muestran una tendencia al incremento del número de ciclones que han tocado tierra firme, caso contrario es lo observado con la intensidad en las últimas dos décadas, donde las tasas de cambio revelan un ligero incremento en la ocurrencia de huracanes intensos en categorías H4 y H5, y el aumento en la frecuencia del impacto de meteoros en categorías de eventos extremos, hecho que se acentúa al considerar los ciclones ocurridos en la temporada 2020. Lo anterior coincide con lo reportado por Walsh (2004) y Walsh *et al.* (2016) quienes concuerdan que, debido al calentamiento global, los escenarios del cambio climático prevén un aumento en el número de ciclones, siendo hacia los años cincuenta del presente siglo cuando se manifieste un incremento en la intensidad máxima entre un 5 y 10%. Elsner, Kossin, y Jagger (2008), Emanuel (2005) y Webster (2005) reportaron también en sus estudios un incremento de huracanes en categoría H4 y H5, lo que resulta coincidente con nuestros resultados.

Se constata en la revisión de la literatura que no existe un consenso para una definición única para la caracterización de los ciclones como eventos extremos, dada la diversidad de disciplinas desde la que se aborda, como son la meteorología, ciencias biológicas y sociales (Stephenson, 2008; WMO, 2015).

Nuestros resultados coinciden con los de Palacio-Aponte (1998) e Ihl y Frausto-Martínez (2014), quienes observaron que la mayor concentración de eventos ciclónicos se presenta en la zona norte y noreste de la península de Yucatán. No obstante, por la ocurrencia de eventos en categoría de extremos, se identifican dos: la zona sur —en la frontera con Belice— y la zona norte, en el canal de Yucatán.

La caracterización de eventos en categoría de extremos (muy raros y extremadamente raros) resulta de vital importancia para conocer las capacidades de

resiliencia y vulnerabilidad de los sistemas socioambientales, la infraestructura y medios de producción de los cuales depende la población de la región.

Los hallazgos del presente estudio pueden coadyuvar con información necesaria para la definición y delimitación de zonas prioritarias de atención ante el impacto de fenómenos de alta intensidad y rara probabilidad de ocurrencia.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Quintana Roo, Unidad Académica Cozumel, y a los Laboratorios de Observación e Investigación Espacial y de Limnología y Ecología Tropical, por la oportunidad para colaborar con el presente estudio. Gabriel Sánchez Rivera agradece el apoyo de la beca otorgada por el CONACYT (597620) para la realización de los estudios de doctorado y el presente escrito, que forma parte de los resultados de la tesis doctoral.

Referencias bibliográficas

- Amante, C., & Eakins, B. W. (2009). *ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis*. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. <https://doi.org/10.7289/V5C8276M>
- Camuffo, D., della Valle, A., & Becherini, F. (2018). A critical analysis of the definitions of climate and hydrological extreme events. *Quaternary International*, September. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2018.10.008>
- Décamps, H. (2008). Ecosystems and extreme climatic events. *Comptes Rendus Geoscience*, 340(9–10), 553–563. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2008.08.004>
- Doval, J. P., Pérez, M. B., Acosta, J. O., & Rodríguez, E. (2013). Caracterización de las trayectorias de los Ciclones Tropicales en la Cuenca Atlántica en relación con la actividad solar y otras variables. *XI Congreso Cubano de Informática y Geociencias (GEOINFO'2013)*, 18.
- Elsner, J. B., Kossin, J. P., & Jagger, T. H. (2008). The increasing intensity of the strongest tropical cyclones. *Nature*, 455(7209), 92–95. <https://doi.org/10.1038/nature07234>
- Emanuel, K. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051), 686–688. <https://doi.org/10.1038/nature03906>
- Flanders Marine Institute. (2018). *IHO Sea Areas, version 3*. <https://doi.org/10.14284/323>
- Holland, G., & Bruyère, C. L. (2014). Recent intense hurricane response to global climate change. *Climate Dynamics*, 42(3–4), 617–627. <https://doi.org/10.1007/s00382-013-1713-0>
- IBTrACS. (2019a). *IBTrACS v04r00 - Online browsing*. International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS). NOAA. <https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/index.php>
- IBTrACS. (2019b). International Best Track Archive for Climate Stewardship (IBTrACS). Technical Documentation. En *National Oceanic and Atmospheric Administration, National Climatic Data Center*. https://www.ncdc.noaa.gov/ibtracs/pdf/IBTrACS_version4_Technical_Details.pdf
- IBTrACS. (2020). *Browse IBTrACS*. <http://ibtracs.unca.edu/index.php?name=browse-year-basin>
- Ihl, T., & Frausto-Martínez, O. (2014). El Cambio Climático y los huracanes en la Península de Yucatán. En *Frausto Martínez, Oscar (Coord). Monitoreo de riesgo y desastre asociados a fenómenos hidrometeorológicos y cambio climático*. (pp. 42–49). Universidad de Quintana Roo - REDESClim - CONACYT. <https://www.mendeley.com/catalogue/monitoreo-riesgo-y-desastre-asociados-fenomenos-hidrometeorologicos-y-cambio-climatico/>

- INEGI. (2019). *Marco Geoestadístico*. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/default.html#Descargas>
- Knapp, K. R., Diamond, H. J., Kossin, J. P., Kruk, M. C., & Schreck III, C. J. (2018, marzo). *International Best Track Archive for Climate Stewardship (IB-TrACS) Project, Version 4. Subset: NA - North Atlantic*. NOAA National Centers for Environmental Information. non-gonvernement domain. <https://data.nodc.noaa.gov/cgi-bin/iso?id=gov.noaa.ncdc:C01552>
- Knapp, Kenneth R., & Kruk, M. C. (2010). Quantifying Interagency Differences in Tropical Cyclone Best-Track Wind Speed Estimates. *Monthly Weather Review*, 138(4), 1459–1473. <https://doi.org/10.1175/2009MWR3123.1>
- Lazos-Chavero, E., Mwampamba, T. H., & García-Frapolli, E. (2018). Uncovering links between livelihoods, land-use practices, vulnerability and forests after hurricane Jova in Jalisco, Mexico. *Forest Ecology and Management*, 426 (Junio 2017), 27–38. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.10.009>
- NHC. (2019). *Glossary of NHC Terms*. Centro Nacional de Huracanes de los Estados Unidos de América. <https://www.nhc.noaa.gov/aboutgloss.shtml>
- Palacio-Aponte, A. G. (1998). Susceptibilidad regional del terreno y riesgos por huracanes en la zona costera del Golfo de México. *JAINA. EPOMEX*, 9(2), 2.
- Rosengaus-Moshinsky, M., Jiménez-Espinosa, M., & Vázquez-Conde, M. T. (2002). *Atlas Climatológico de Ciclones Tropicales en México*. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/37.pdf>
- Saunders, M., & Lea, A. (2010). Extended Range Forecast for Atlantic Hurricane Activity in 2011. *Tropical Storm Risk (TSR)*, 6th December 2010, 4. <http://www.tropicalstormrisk.com/docs/TSRATLForecastDec2011.pdf>
- Schott, T., Landsea, C., Hafele, G., Lorens, J., Thurm, H., Ward, B., Willis, M., & Zaleski, W. (2012). The Saffir-Simpson Hurricane Wind Scale. *National Hurricane Center, February*, 1–4. <http://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws.pdf>
- SECTUR. (2008). *Programa Rector de Desarrollo Costero del Estado de Quintana Roo. Programa de Gran Visión de Desarrollo del Litoral*. <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/CGPMM/PNDP2008/doc/pred/pqroo.pdf>
- Stephenson, D. B. (2008). Definition, diagnosis, and origin of extreme weather and climate events. En H. F. Diaz & R. J. Murnane (Eds.), *Diaz, H.F., Murnane, R.J. (Eds.), Climate Extremes and Society*. Cambridge University Press, Cambridge. (pp. 11–23). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535840.004>
- Vecchi, G. A., & Knutson, T. R. (2008). On Estimates of Historical North Atlantic Tropical Cyclone Activity. *Journal of Climate*, 21(14), 3580–3600. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2178.1>

- Vidal-Zepeda, R. (2005). *Las regiones climáticas de México*. 213. <http://132.247.70.148/index.php/rig/article/view/30041>
- Walsh, K. J. E. (2004). Tropical cyclones and climate change: unresolved issues. *Climate Research*, 27(1), 77–83. <https://doi.org/10.3354/cr027077>
- Walsh, K. J. E., McBride, J. L., Klotzbach, P. J., Balachandran, S., Camargo, S. J., Holland, G., Knutson, T. R., Kossin, J. P., Lee, T., Sobel, A., & Sugi, M. (2016). Tropical cyclones and climate change. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 7(1), 65–89. <https://doi.org/10.1002/wcc.371>
- Webster, P. J. (2005). Changes in Tropical Cyclone Number, Duration, and Intensity in a Warming Environment. *Science*, 309(5742), 1844–1846. <https://doi.org/10.1126/science.1116448>
- WMO. (2015). *Guidelines on the Definition and Monitoring of Extreme Weather and Climate Events. Draft version – First review by TT-DEWCE* (Número December). World Meteorological Organization.
- WMO. (2018). *Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events. Final Version*. World Meteorological Organization.

Capítulo XIII

Encuentros y desencuentros en la evaluación de la sequía en Veracruz

Ofelia Andrea Valdés-Rodríguez¹, Denise Soares², Jorge Luis Vázquez-Aguirre³

¹ Profesor Investigador del Colegio de Veracruz.

² Profesor Investigador del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

³ Profesor Investigador de la Universidad Veracruzana.

Resumen

La sequía es un fenómeno que, a diferencia de otros fenómenos hidrometeorológicos, requiere de un lapso de tiempo más largo para notarse, y es por ello que es común que no se tomen precauciones para prevenir sus efectos, lo que ocasiona graves pérdidas a los sistemas socio-ecológicos. En estos términos, analizar la forma en que se presenta el fenómeno y cómo lo tratan los organismos públicos a cargo de su monitoreo y atención permitirá encontrar mejores pautas para atenuar sus efectos. El objetivo de esta investigación es analizar la correspondencia metodológica entre el Monitor de Sequía del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) y las declaraciones de desastre por sequía emitidas por el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). Para ello se revisaron conjuntamente las bases de datos del SMN y las del CENAPRED correspondientes al estado de Veracruz, en un periodo que comprendió desde el año 2000 al 2019. Los resultados del SMN indican que la sequía se ha incrementado, pasando de más del 50% en niveles anormalmente secos en 2003 a más del 50% en niveles severos, extremos y excepcionales en los municipios del estado en 2019. Sin embargo, existen divergencias en las diferentes denominaciones de sequía por parte del SMN y del CENAPRED, ya que este último maneja una terminología diferente al SMN para clasificar los tipos de sequía, lo que dificulta comparar ambas bases de datos; no obstante, el número de declaratorias de sequía emitidas por el CENAPRED también ha registrado incrementos paulatinos, llegando a su máximo nivel en 2019. Por lo que se recomienda homogeneizar los instrumentos de operación legales a partir de los criterios del SMN para clasificar los mismos tipos de sequía en ambas dependencias, y así mejorar los enlaces y capacidades interinstitucionales, lo que permitirá atender el fenómeno de la sequía de manera conjunta.

Introducción

La sequía es un fenómeno meteorológico complejo, ya que, de acuerdo con el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA, 2019), se considera que un sitio presenta una sequía cuando existe una deficiencia de humedad o precipitación anormal y persistente durante un periodo de tiempo tal, que tiene un impacto adverso sobre la flora y la fauna, incluido el ser humano. Este periodo de tiempo está relacionado con el promedio histórico del sitio.

De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2006) y el Centro Nacional para la Prevención de Desastres (CENAPRED) (García Jiménez, Fuentes Mariles, & Matías Ramírez, 2014), dependiendo del enfoque con el que se le analiza, la sequía se puede clasificar en cuatro tipos:

- *Sequía meteorológica.* Se define a partir de un déficit de precipitación en un periodo de tiempo dado que depende del sitio, y se considera un fenómeno natural.
- *Sequía agrícola.* Se considera a partir de la disminución en la disponibilidad de agua para los cultivos.
- *Sequía hidrológica.* Representa una carencia de flujos de agua superficial y o subterránea.
- *Sequía socioeconómica.* Ocurre cuando la disponibilidad de agua es menor a su demanda.

En México, el organismo a cargo de emitir información sobre la sequía es el Servicio Meteorológico Nacional (SMN), dependiente de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y quien toma la misma clasificación de la OMM para analizar la evolución de este fenómeno en el país mediante su Monitor de Sequía (SMN, 2020). Este monitor solo posee información al público a partir del año 2003; no obstante, existen registros históricos sobre problemas derivados de sequías en el norte, centro y sur de país desde la época colonial (Domínguez, 2016), lo cual indica que este fenómeno es recurrente en México.

Actualmente las contingencias meteorológicas ocasionadas por sequía que requieren una intervención gubernamental se atienden a través del Sistema Nacional de Protección Civil (SINAPROC), dependiente de la Secretaría de Gobernación, quien es responsable de emitir cualquier declaratoria de emergencia ante la inminencia o alta probabilidad de un desastre que ponga en riesgo la vida humana, de acuerdo con los lineamientos emitidos en el Diario Oficial de la Federación (Gomez Mont Uruete, 2008). En estos lineamientos se establece que la CONAGUA será la instancia técnica facultada para determinar los desastres

hidrometeorológicos. El procedimiento del Fondo para la Atención de Emergencias FONDEN (FONDEN) establece que la entidad federativa afectada debe solicitar a su coordinación de Protección Civil (PC) la declaración de la emergencia, y esta a su vez debe solicitar el dictamen de corroboración a la instancia técnica correspondiente, quien emite el dictamen, que permite a la coordinación de PC publicar un boletín de prensa para que la entidad pueda solicitar al FONDEN los recursos pertinentes. En este proceso, cualquier municipio afectado por algún evento desastroso, puede tener acceso al Fondo para la Atención de Emergencias (SSPC, 2019). Aunque la instancia que debe determinar si existe un desastre por sequía es la CONAGUA, es el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) quien lleva los registros del Sistema de Consulta de Declaratorias de Desastre, Emergencia y Contingencia Climatológica (CENAPRED, 2019; 2020), donde las sequías se engloban dentro de los fenómenos de contingencia climatológica. Por tanto, esta investigación tiene como finalidad analizar la relación entre las declaratorias de sequía registradas por el CENAPRED y los niveles de sequía registrados en el Monitor de Sequía del SMN para el estado de Veracruz.

Metodología

Para comparar los datos del SMN y del CENAPRED, se revisaron las bases de datos disponibles que ambas dependencias poseen desde el año 2003 hasta el 2019, tanto para declaratorias de emergencia por sequía, como las del monitor de sequía y las estaciones climatológicas del SMN (CENAPRED, 2019; SMN, 2019, 2020), por ser el periodo donde ambos organismos presentaron datos públicos. Se consideraron todos los municipios que presentaron declaratorias registradas en CENAPRED y se compararon las definiciones que cada uno de estos organismos utiliza para catalogar los tipos o niveles de sequía. Posteriormente, se compararon las declaraciones emitidas por el CENAPRED contra los niveles de sequía estimados por el monitor del SMN y se localizaron las estaciones meteorológicas dentro del municipio para evaluar la cobertura del sitio por el SMN.

Resultados y discusión

Clasificación de las sequías

El Cuadro 1 muestra las clasificaciones que se reportan en el SMN y el CENAPRED. Se puede notar que no existen clasificaciones que correspondan plenamente entre ambos organismos, ya que CENAPRED se basa en una clasificación que establece la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA y ahora SADER –Secretaría de Agricultura

y Desarrollo Rural—) (SEMARNAT, 2020), quien al parecer considera las implicaciones agrícolas y pecuarias para definir sus clasificaciones, ya que no existe un documento técnico específico donde se detallen, más allá de lo expresado en una iniciativa de ley publicada por el Diario Oficial de la Federación, en el 2004 (Usabiaga Arroyo, 2004). No obstante, la definición de sequía atípica no aparece específicamente dada, por lo que es difícil establecer qué criterios se toman para ésta. La falta de uniformidad en los criterios entre dependencias genera confusión cuando se pretende determinar qué niveles de sequía se encontraban presentes durante estas catástrofes y, por tanto, afecta una correcta planificación de los riesgos a los que cualquier municipio se pueda enfrentar en el futuro.

Cuadro 1. Clasificaciones de la sequía de acuerdo al SMN y al CENAPRED

SMN		CENAPRED	
Categoría	Definición	Categoría	Definición
Anormalmente seco (D0)	Es una condición de sequedad, que al inicio de un período de sequía puede ocasionar retraso de siembra de cultivos, limitar su crecimiento y aumentar riesgo de incendios. Al final del período de sequía persiste déficit de agua, y pastos o cultivos pueden no recuperarse por completo.		
Sequía moderada (D1)	Se presentan algunos daños en los cultivos y pastos; existe un alto riesgo de incendios, bajos niveles en ríos, arroyos, embalses, abrevaderos y pozos, se sugiere restricción voluntaria en el uso del agua.		
Sequía severa (D2)	Probables pérdidas en cultivos o pastos, alto riesgo de incendios, escasez de agua, se deben imponer restricciones en el uso del agua.	Sequía atípica	(No se encontró definición específica)

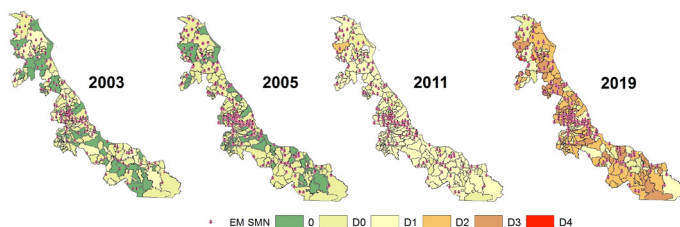
Sequía extrema (D3)	Pérdidas mayores en cultivos y pastos, riesgo de incendios forestales extremos, generalización de las restricciones en el uso del agua debido a su escasez.	Sequía atípica, impredecible y no recurrente	Desbalance temporal de la disponibilidad hidráulica que consiste en precipitaciones persistentes menores que el promedio, de frecuencia, duración y severidad incierta y de ocurrencia impredecible y no recurrente.
Sequía excepcional (D4)	Pérdidas excepcionales y generalizadas de cultivos o pastos, riesgo excepcional de incendios, escasez total de agua en embalses, arroyos y pozos, y posible emergencia debido a la ausencia de agua.	Desastre SAGARPA	Declaratorias emitidas por la SAGARPA como resultado de desastres causados en el sector agropecuario, acuícola o pesquero.

Fuentes: SMN (NADM, 2020) y Diario Oficial de la Federación (Usabiaga Arroyo, 2004).

Niveles de sequía y su relación con las declaratorias de emergencia por sequía

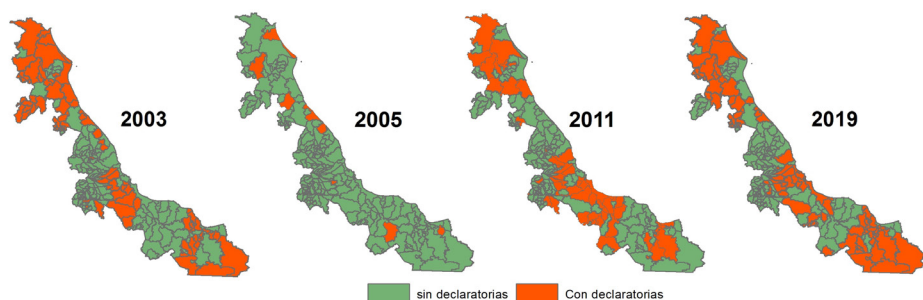
Desde las publicaciones de los registros de sequía del SMN y las declaratorias emitidas por CENAPRED se observa que existe un incremento sustancial en los mismos, llegándose a los niveles más altos en el 2019 (figura 1), con el 100% del territorio veracruzano en algún nivel de sequía, lo cual coincidió con un total de 75 declaratorias de emergencia del CENAPRED, cuyos registros indican una duración mínima de ocho meses para este último año (CENAPRED, 2020).

Figura 1. Niveles de sequía predominantes en los municipios del estado de Veracruz durante los años 2003, 2005, 2011 y 2019. EM SMN: ubicación de las estaciones meteorológicas del SMN, 0: sin registro de sequía, D0: anormalmente seco, D1: sequía moderada, D2: sequía severa, D3: sequía extrema, D4: sequía excepcional



Fuente: valores estimados con datos del monitor de sequía (SMN, 2020).

Figura 2. Municipios con declaratorias de emergencia por sequía durante los años 2003, 2005, 2011 y 2019



Fuente: CENAPRED (2020).

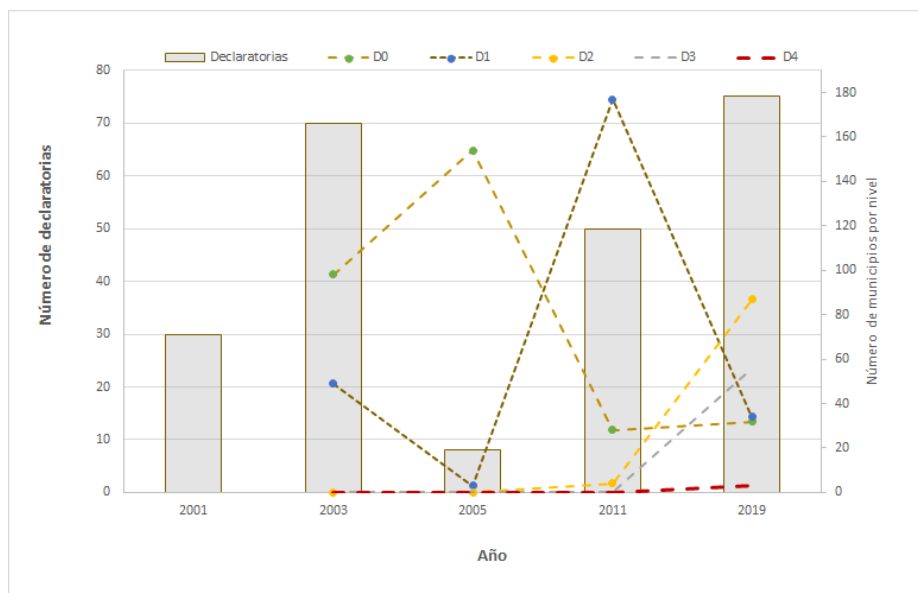
Esta situación es un indicativo de que el aumento en los niveles sequía han causado graves pérdidas en los sectores agrícola y ganadero en municipios del norte, centro y sur del estado. Por citar algunos ejemplos, algunos municipios del centro, como Camarón de Tejada, Comapa, Puente Nacional y Jamapa, han emitido cuatro declaratorias de emergencia desde el 2002 (figura 2), pero esta situación no se refleja en el monitor de sequía del SMN para los años 2003 y 2005, donde solo se observan sequías moderadas para esta región (figura 1). Desafortunadamente, cuando se buscaron las estaciones meteorológicas asociadas a estos municipios se encontró que solamente una estación, la de Camarón de Tejada, posee registros hasta el 2018, lo que no permite analizar el comportamiento en el peor año de sequía, que fue el 2019, además de que esta estación posee únicamente el 33.7% del total de registros que debería de tener para todo el periodo en que el que ha estado operando, ya que existen lapsos de varios meses sin datos a lo largo de toda la serie, lo que de acuerdo con la OMM (2018) no permite hacer un análisis climatológico por la enorme carencia de datos. Por su parte, las estaciones de Comapa y Puente Nacional tampoco tienen el 100% de los registros y solo poseen datos hasta el 2009 y 2010 respectivamente, mientras que no se localizó ninguna estación del SMN para el municipio de Jamapa (figura 1).

Ante esta situación, el análisis de los datos municipales del número de declaratorias contra el número de municipios con niveles de sequía fue el único medio que permitió ver cierta correspondencia entre ambos registros. En la Figura 3 se observa que, después del 2019, el 2003 fue el año con mayor cantidad de declaratorias emitidas, pero para este año no se tienen registros de niveles altos de sequía por parte del SMN, posiblemente debido a que los registros apenas inician a partir del 2002, aunque no se conoce la realidad. Lo que sí puede apreciarse es

que el número de municipios en nivel D0 y D1 fue ligeramente inferior que el año 2005, en 2011 aparecieron ya cuatro municipios en nivel D2 distribuidos en norte centro y sur del estado, y para 2019 se registraron niveles D3 a todo lo largo de la entidad y D4 en algunos municipios del norte y centro del estado. Este último año el CENAPRED registró el fenómeno como Sequía Severa en sus declaratorias, lo que correspondería al nivel D3, pero que de acuerdo con el SMN es nivel D4. De ahí que este análisis evidencia las divergencias entre estos dos organismos, que, aunque ambos son dependencias federales, no parecen tener sincronización en sus terminologías.

Por una parte, CENAPRED maneja declaratorias que no son acordes con el SMN, mientras que el SMN no posee estaciones climatológicas en todos los municipios que están teniendo problemas de sequía, ni la calidad de los datos es la adecuada (Luna Díaz Peón, Valdes Rodríguez, & Solís Villanueva, 2018), lo cual contradice las recomendaciones de la OMM (2011), que establece que para conocer detalladamente la evolución de las sequías y poder proporcionar alertas tempranas se requiere una metodología integrada y de amplio alcance, y que, por tanto, no se está cumpliendo en Veracruz.

Figura 3. Número de declaratorias de emergencia por sequía *versus* número de municipios con niveles de sequía D0 a D4



Fuentes: elaborado con datos de CENAPRED (2020) y el SMN (2020).

Dada la mala cobertura del SMN para con los municipios y la falta de coordinación entre los registros del CENAPRED y el SMM, es imperativo que se tomen acciones inmediatas para contar con la tecnología, equipos adecuados y registros de calidad que permitan emitir las alertas correspondientes y evitar los daños a los sistemas agroalimentarios del estado, así como sus correspondientes costos. Adicionalmente, también se requiere que las coordinaciones de PC de cada entidad tengan una mejor asesoría por parte del SMN para manejar los mismos criterios al clasificar la sequía en sus boletines, que son los que el CENAPRED toma para sus registros.

Conclusiones

Los registros de sequía llevados por el monitor del SMN indican que existe un aumento sustancial a partir del inicio de los mismos, llegando a sus niveles más altos en el 2019, lo cual coincide con el incremento en el número de declaratorias de desastre por sequía del CENAPRED; no obstante, cada organismo clasifica el fenómeno de diferente manera, por lo que se dificulta un análisis conjunto. Adicionalmente, se encontró que el SMN no posee datos climatológicos completos ni de calidad para realizar un análisis que permita establecer diagnósticos confiables. Por ello, se requiere mejorar la cobertura de los sistemas de monitoreo del SMN, para poder contar con mecanismos eficientes que permitan realizar alertas de sequía para el estado de Veracruz, así como coordinar los registros del CENAPRED con los del SMN, para poder realizar un mejor análisis de los desastres ocasionados por este fenómeno.

Referencias bibliográficas

- CENAPRED, (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2019). Declaratorias sobre emergencia, desastre y contingencia climatológica. Recuperado el 12 de febrero de 2020, de <https://datos.gob.mx/busca/dataset/declaratorias-sobre-emergencia-desastre-y-contingencia-climatologica>
- CENAPRED, (Centro Nacional de Prevención de Desastres). (2020). Sistema de Consulta de Declaratorias. Recuperado de <http://www.atlasnacionalderiesgos.gob.mx/apps/Declaratorias/>
- Domínguez, J. (2016). Revisión histórica de las sequías en México: De la explicación divina a la incorporación de la ciencia. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 7(5), 77–93.
- García Jiménez, F., Fuentes Mariles, O., & Matías Ramírez, L. G. (2014). *Fascículo sequías. Centro Nacional de Prevención de Desastres* (1a ed.). México.
- Gómez Mont Uruete, F. ACUERDO que establece los Lineamientos para emitir las Declaratorias de Emergencia y la utilización del Fondo Revolvente FONDEN (2008). Diario Oficial de la Federación. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5076653&fecha=31/12/2008
- IMTA, (Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. (2019). ¿Qué son las sequías? | Instituto Mexicano de Tecnología del Agua | Gobierno | gob.mx. Recuperado el 12 de febrero de 2020, de <https://www.gob.mx/imta/articulos/que-son-las-sequias>
- Luna Díaz Peón, A., Valdes Rodríguez, O. A., & Solís Villanueva, J. (2018). Información climatológica de Veracruz, México. En H. C. Noé, M. Nava Tablada, & L. Ruelas Monjardín (Eds.), *Sustentabilidad del desarrollo: desafíos y propuestas* (1a ed., pp. 163–173). Xalapa: Gobierno del Estado de México.
- NADM, M. de S. de A. del N. (2020). Categorías de Sequía. Recuperado de <https://smn.conagua.gob.mx/es/categorias-de-sequia>
- OMM, (Organización meteorologica mundial). (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía. Información meteorológica y climática para el desarrollo agrícola sostenible*. (2006a ed., Vol. 1006). Organización Meteorológica Mundial.
- OMM, (Organización meteorologica mundial). (2011). Quantification of Agricultural Drought for Effective Drought Mitigation and Preparedness: Key Issues and Challenges. En D. A. W. and D. A. W. (Eds.). Sivakumar, Mannava V.K., Raymond P. Motha (Ed.), *Agricultural Drought Indices Proceedings of a WMO Expert Meeting held in Murcia, Spain* (p. 15). Murcia.
- OMM, (Organización Meteorológica Mundial). (2018). *Guía de prácticas climatológicas*. (O. M. Mundial, Ed.) (100a ed.). Geneva: Organización Meteorológica Mundial.

- SMN, (Servicio Meteorológico Nacional). (2019). Información Estadística Climatológica. Recuperado el 20 de septiembre de 2019, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/informacion-climatologica/informacion-estadistica-climatologica>
- SMN, (Servicio Meteorológico Nacional). (2020). Monitor de Sequía en México. Recuperado el 12 de febrero de 2020, de <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/monitor-de-sequia/monitor-de-sequia-en-mexico>
- SSPC, (Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana). (2019). Fondo para la Atención de Emergencias FONDEN. Recuperado de <https://www.gob.mx/sspc/documentos/fondo-para-la-atencion-de-emergencias-fonden>
- Usabiaga Arroyo, B. Modificaciones y adiciones a las Reglas de Operación del Programa del Fondo para Atender a la Población Afectada por Contingencias Climatológicas, Diario Oficial de la Federación § (2004). México: Secretaría de Gobernación. Recuperado de http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=672758&fecha=23/04/2004

Capítulo XIV

Análisis de los datos de precipitación en el municipio de Xalapa, Veracruz, calidad y disponibilidad de la información

Antonio Luna Díaz Peón

Universidad Veracruzana, Lomas del Estadio S/N, Zona Universitaria, Xalapa,
Veracruz, México. Centro de Investigación Atmosférica y Ecológica.
Miembro de REDESClim. diazpeon@yahoo.com.mx

Resumen

Cada año se presenta al menos un evento de inundación en municipio de Xalapa a causa de un sistema hidrometeorológico. En tales eventos, es recurrente la aseveración por parte de los medios de comunicación, dependencias de gobierno o la misma población, de que en el pasado nunca había sucedido y cada día se menciona más el término de lluvias catastróficas o extremas. Bajo esta situación, el presente trabajo analiza la climatología de la precipitación en el municipio de Xalapa con el fin de entender y conocer su comportamiento histórico y determinar si las lluvias de los últimos años son o no más intensas.

Para llevar a cabo la investigación, se consultó la información climatológica de precipitación del SMN ubicada en el municipio de Xalapa. Se revisaron dos aspectos, el temporal y el espacial, se verificaron que las coordenadas de cada uno de los puntos que de manera oficial corresponda con la ubicación actual.

Como resultado, se comprobó que existe información climatológica de precipitación de seis lugares, cinco estaciones climatológicas y un observatorio meteorológico. La cobertura espacial es principalmente en el este, sureste y centro del municipio. En lo temporal se muestra que existen datos climatológicos desde 1952 y que no ha habido aumento significativo de la precipitación.

Se concluye que las precipitaciones no han aumentado en su intensidad y que su variabilidad entre los años es la que ha determinado esas malas percepciones sobre lluvias nunca antes registradas. Además, se demuestra que las estaciones climatológicas no miden la misma precipitación en todos los puntos, aun y cuando sea producto de un sistema bien organizado.

Se recomienda que al utilizar bases de datos se consideren todos los puntos y verificar que la ubicación que da la fuente oficial se haga una inspección física por los errores encontrados en esta investigación.

Introducción

En el municipio de Xalapa, cada año sabemos de por lo menos un evento de inundación producto de un sistema hidrometeorológico tropical (ciclones tropicales u ondas tropicales), sistemas invernales (frentes) o simplemente sistemas convectivos locales; sin embargo, también cada año se menciona por medios periodísticos y gubernamentales, incluso por la población misma, que en el pasado nunca había sucedido y cada día se menciona más el término de lluvias catastróficas o extremas (Al calor político, 2020; Ayuntamiento de Xalapa, 2020; Diario de Xalapa, 2020). Por lo antes expuesto, en los tiempos actuales la sociedad demanda contar con información de precipitación que le permita la planeación del desarrollo de sus actividades, minimizar riesgos por eventos meteorológicos extremos y que esta sea de calidad. Por ello, se requiere contar con investigaciones meteorológicas y climatológicas que no se queden truncadas a consecuencia de la falta o escasez de datos. La información es requerida por los distintos sectores productivos y profesionales. Así, arquitectos, ingenieros, agrónomos, biólogos, entre otros profesionales, son usuarios finales de esta información. Sin embargo, cuando esta se requiere, sólo puede ser proporcionada por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), a través del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), quien es encargada de administrarla y es considerada como fuente oficial (SMN, 2020b). No obstante, como ya se ha documentado, dicha información tiene errores de captura, por instrumental obsoleto o chatarra, por falta de capacitación al personal que lo opera o porque simplemente ya no se mide (Luna Díaz Peón, Valdés Rodríguez, y Villanueva Solís, 2018).

Los mismos autores indican que la red de información climatológica con que se cuenta en el estado de Veracruz no cubre todos los puntos del territorio y, más aún, en la mayoría de los casos la información es menor a 30 años. Lo anterior es debido a la orografía tan accidentada entre otros aspectos. Para el municipio de Xalapa se cuenta con información de un observatorio meteorológico y cinco estaciones climatológicas; sin embargo, también debido a la orografía, podría no ser óptima, específicamente para precipitación.

En México, Veracruz es el estado que presenta mayor frecuencia de inundaciones, con un promedio de 4 eventos por año; además, en el estado se concentra más del 30% del caudal de los ríos del país y el mayor volumen de agua superficial de México (Luna & Acevedo, 2006; Luna & Rivera, 2012).

La precipitación en el Municipio de Xalapa

La precipitación es altamente variable, tanto en espacio como en tiempo. De hecho, cuando consideramos el efecto orográfico asociado a la precipitación, este suele ser en algunos casos un riesgo por deslaves. La información exacta de precipitación no se conoce debido a la falta de continuidad de registros (Luna Díaz Peón *et al.*, 2018). Se sabe que existen zonas inundables, pero no se conoce con cuánta cantidad de precipitación es que ocurre dicha inundación, por lo que es necesario contar con información de intensidad de precipitación, sobre todo en procesos de inundación.

Metodología

Por lo anterior, trataremos la precipitación desde dos puntos de vista: el espacial y el temporal, ya que cuando se requiere de dicha información histórica para una localidad, la fuente oficial (Comisión Nacional del Agua, CONAGUA) cuenta con datos de la o las estaciones que en ella se encuentren o la del lugar más cercano; no obstante, se desconoce qué tan confiable es dicha información, para ello detallaremos el caso del municipio de Xalapa.

Distribución espacial de los datos de precipitación

La información de precipitación con la que cuenta el municipio de Xalapa proviene de 6 puntos, cinco estaciones climatológicas, éstas son lugares donde se registra de forma diaria en una sola ocasión, a las 08:00 hrs., las mediciones atmosféricas de temperatura, precipitación, evaporación y viento. Para el caso de la temperatura se considera la promedio (entre la máxima y la mínima), la máxima que normalmente se registra dos horas después del mediodía, y la mínima que se presenta comúnmente pocos minutos después del orto solar. Para el caso de la precipitación y la evaporación son las acumuladas en esas últimas 24 hrs. por lo que se desconoce en qué momento inicia y termina y a qué hora se dio el máximo registro; esto, con el fin de determinar los riesgos y cuantificar los daños.

Además, se cuenta con un Observatorio Meteorológico, que es un lugar donde se realizan mediciones a cada momento y se registran cada 15 minutos temperatura promedio, máxima, mínima, oscilación térmica, punto de rocío, tensión de vapor, humedad relativa, precipitación, insolación, presión atmosférica de la estación y la reducida al nivel del mar, dirección e intensidad del viento; además, viento dominante, tipo de nubes, cantidad y dirección de donde provienen, visibilidad (distancia mínima), tipo de precipitación, granizo, niebla, rocío, escarcha, helada —y, en su caso, nevada—, calima, humo, polvo, tolvana, tromba, halo, arcoíris, truenos, relámpagos, tormenta eléctrica.

Esta información se comparte con los organismos nacionales e internacionales encargados de los pronósticos meteorológicos y climatológicos pertenecientes a la Organización Meteorológica Mundial (OMM, 2020) y es utilizada, entre varias cosas, para el pronóstico del tiempo, operado por personal capacitado; en contraste, en esta ubicación sí se puede conocer la duración de la precipitación, además de los momentos de máximo registro.

Considerando la información proporcionada por el Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2020), las estaciones climatológicas se ubican en las colonias, La Loma (estación 30075), Santa Rosa (estación 30087), Sumidero (estación 30135), El Tejar (estación 30228, es una reserva ecológica), José Cardel (estación 30488) y Xalapa 2000 (Observatorio Meteorológico de Xalapa, 76687), como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Ubicación geográfica de los puntos de medición de precipitación del municipio de Xalapa

CLAVE	LATITUD	LONGITUD	ALTURA (msnm)	NOMBRE
30075	19.51	-96.90	1360	JALAPA DE ENRÍQUEZ (OBS)
30087	19.50	-96.89	1281	LAS ÁNIMAS
30135	19.55	-96.85	1138	XALAPA (CFE)
30228	19.52	-96.90	1365	JALAPA DE ENRIQUEZ (DGE)
30488	19.54	-96.92	1452	Sin nombre
76687	19.51	-96.90	1369	OMX

Fuente: elaboración propia con información del SMN (SMN, 2020).

Los datos climatológicos de las estaciones del municipio de Xalapa se obtuvieron de la página del SMN (SMN, 2020b). Se revisaron inconsistencias o errores, como precipitaciones menores a cero o valores extremos. Las bases de datos se trabajaron con estadísticas, principalmente de series de tiempo, valores extremos y medidas de tendencia central. Con la información de las coordenadas geográficas que proporciona la dependencia, estas se ubicaron en un mapa georeferenciado.

Resultados

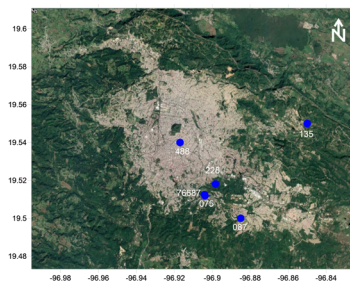
Distribución espacial de datos de precipitación

La distribución espacial de las estaciones (SMN, 2020) cubren parte del este, sureste y centro del Municipio de Xalapa; sin embargo, no es suficiente para determinar una precipitación que cause afectaciones. Por ejemplo, para el caso de las regiones norte, noroeste, oeste y suroeste no existe información (figura 1).

Además, en la mayoría de las estaciones existen errores de ubicación, por ejemplo, la estación 30075 JALAPA DE ENRÍQUEZ (OBS) se ubica a una distancia de 800 m al este de su ubicación real, dicha estación está considerada como observatorio, por lo que hace confusa su información por su forma de medir, como ya se especificó anteriormente. En la 30087 LAS ÁNIMAS, el SMN la ubica al sur de Lomas Verdes y su localización real está al sur de la tienda comercial Costco, con una diferencia de 1.65 km. La estación 30135 XALAPA (CFE) fue ubicada por el SMN en la congregación de El Castillo, a una distancia de 8.9 km al Este-Noreste de su ubicación real, que es en la calle Allende, específicamente en las instalaciones de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Por su parte, la estación 30228 JALAPA DE ENRÍQUEZ (DGE), la ubican en la Reserva Natural El Tejar y la estación 30488 Sin Nombre en la colonia Jardín, de estas dos últimas se desconoce si tienen error de ubicación.

Finalmente, el Observatorio Meteorológico de Xalapa, identificado internacionalmente con el número 76687, mostró en su información que hasta mediados de los años ochenta se ubicaba en el Palacio de Gobierno, en pleno centro de la ciudad. En ese entonces fue reubicado en las instalaciones de la escuela Secundaria Federal número 5, en la esquina de Mariano Matamoros y Mendoza, hasta el último día del año 1999. Actualmente se ubica en Xalapa 2000 (figura 1 y tabla 1).

Figura 1. Ubicación geográfica de los puntos de medición de precipitación en el municipio de Xalapa



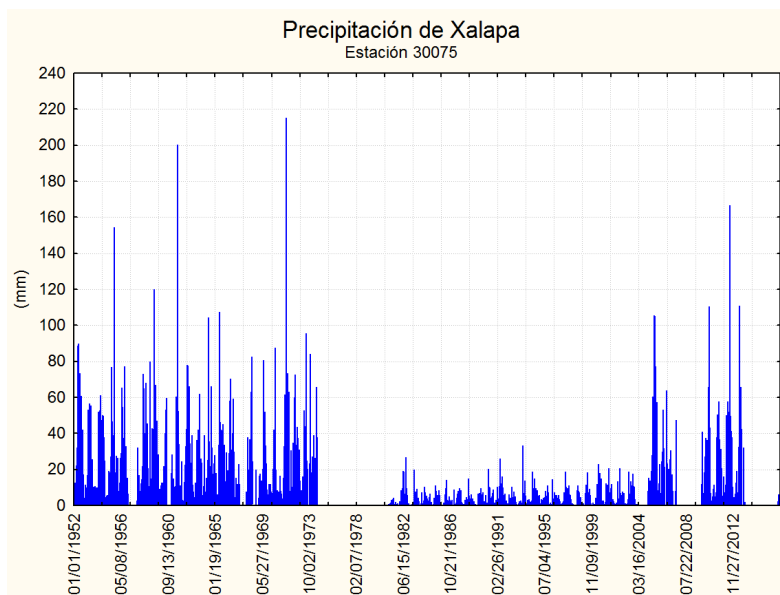
Fuente: elaboración propia con información del SMN (SMN, 2020).

Series de tiempo de precipitación

La precipitación en cada uno de estos puntos a lo largo del tiempo resultó ser la siguiente. En la estación climatológica identificada con el número 30075 JALAPA DE ENRÍQUEZ (OBS) cuenta con registros desde el 1 de enero de 1952; sin embargo, presenta datos faltantes por más de un mes, pero lo más grave es que del 1º de julio de 1974 al 31 de diciembre de 1980 no cuenta con registros, a partir del 1º de enero de 1981 se reanuda la información, pero con datos evidentemente erróneos (figura 2).

Durante el tiempo de operación destacan 95 registros superiores a los 50 mm y 11 de ellos mayores a 100 mm, pero los que realmente resaltan son los sucedidos el 31 de julio de 1961, con 200.4 mm y el 26 de agosto de 1971, con 215.0 mm. Ninguno de estas dos últimos fue ocasionado por algún sistema ciclónico tropical (Luna & Rivera, 2012).

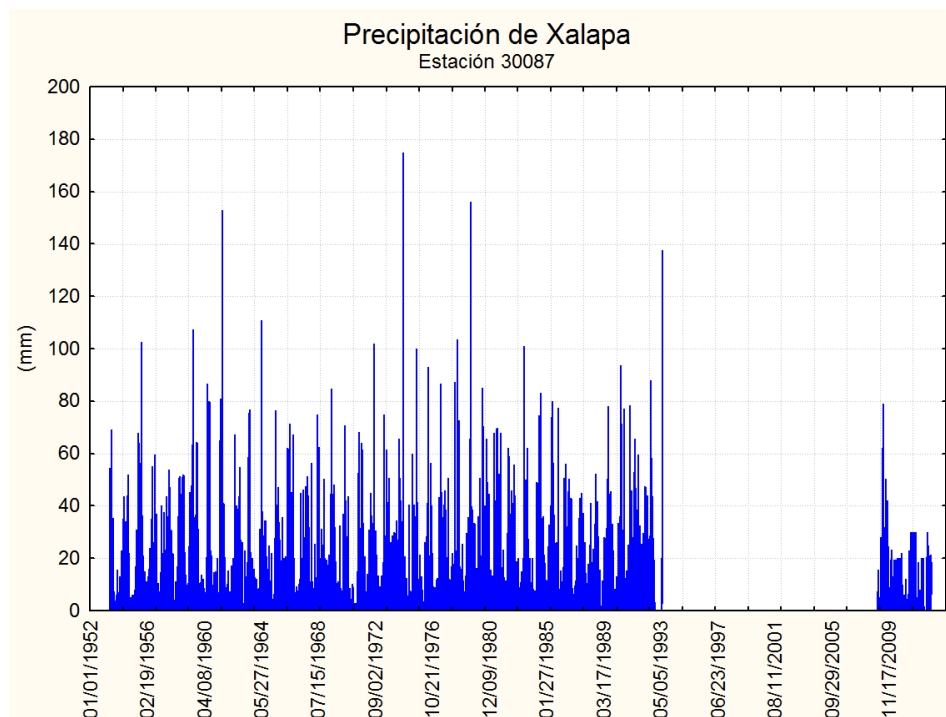
Figura 2. Estación climatológica 30075 JALAPA DE ENRÍQUEZ (OBS)



Fuente: elaboración propia con información del SMN (SMN, 2020).

La estación climatológica 30087 Las Ánimas, comenzó sus registros desde el 4 de junio de 1953. Aunque tuvo algunas interrupciones, fue hasta el 1º de diciembre de 1992 que suspendió sus registros, reanudándose el 1º de enero de 2009 por sólo tres años. Dejó de operar el 31 de diciembre de 2012 (figura 3).

Figura 3. Estación climatológica 30087 Las Ánimas



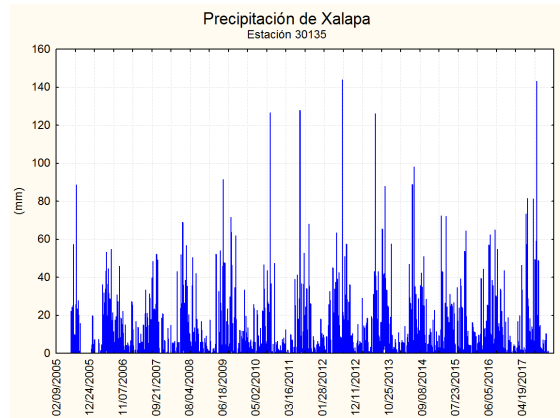
Fuente: elaboración propia con información del SMN (SMN, 2020).

Durante su funcionamiento, tuvo 14 registros superiores a 100 mm destacando dos de ellos en septiembre de 1974, los días 20, con 175 mm y 21, con 160 mm. No existe relación alguna con algún tipo de ciclón tropical, aunque en esas fechas se encontraba el Huracán Fifi en el Oeste del Mar Caribe (NOOA, 2020).

La estación 30135 Xalapa (CFE) comenzó sus registros desde el 1° de julio de 2005, sin embargo, el 1° de octubre dejó de funcionar hasta el 31 de diciembre del mismo año. A partir del 1° de enero de 2006 a la fecha ha sido constante.

Esta estación cuenta con cinco datos superiores a 100 mm, destacan el del 17 de septiembre de 2010 cuando el huracán Karl cruzó por el municipio de Xalapa, dejando una precipitación de 126.7 mm, y el del 8 de septiembre de 2017, con una precipitación de 143.2 mm, producto del Huracán Katia que, aunque ingresó por el norte del estado de Veracruz, sobre Tecolutla, algunas bandas nubosas lograron llegar hasta la capital. Es una estación que muestra un patrón de comportamiento normal entre los meses lluviosos y los poco lluviosos (figura 3).

Figura 4. Estación climatológica 30135 Xalapa (CFE)

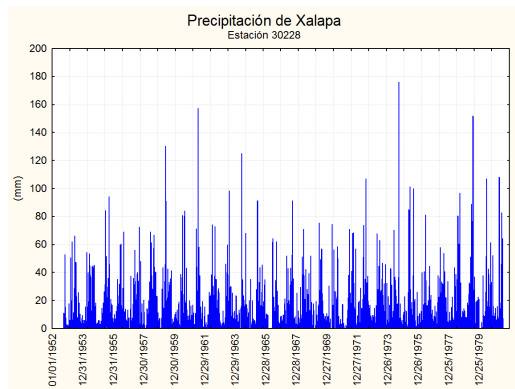


Fuente: elaboración propia con información del SMN (SMN, 2020).

La estación 30228 JALAPA DE ENRÍQUEZ (DGE) cuenta con información desde el 1 de octubre de 1952. Aunque tuvo datos faltantes, en algunos casos por poco más de un mes continuo, se mantuvo constante en sus registros hasta el 22 de julio de 1981.

Destacan los días 1º de septiembre de 1974, con un registro máximo de 176.2 mm, coincidiendo con la estación 30087 que anteriormente ya se documentó. Para esta estación fueron 11 registros los que tuvo superiores a los 100 mm, al igual que las anteriores, ningún caso fue por algún ciclón tropical.

Figura 5. Estación climatológica 30228 JALAPA DE ENRÍQUEZ (DGE)



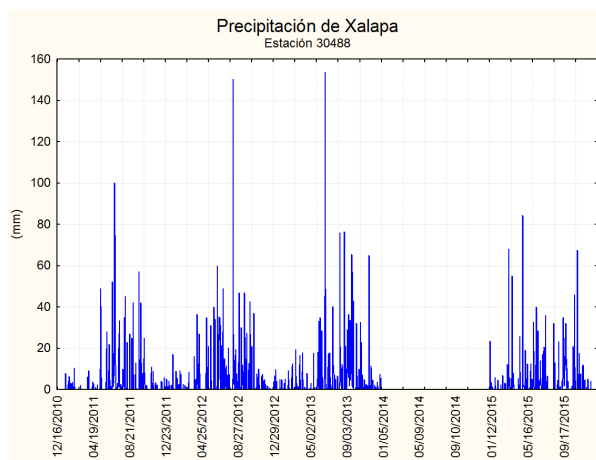
Fuente: elaboración propia con información del SMN (SMN, 2020).

La estación 30488, que aparece sin nombre, cuenta con registros desde el 1º de enero de 2011 y, aunque es de reciente creación, es de importancia para tener una idea del comportamiento de la precipitación en el municipio de Xalapa (figura 6).

Destacan las fechas 20 de junio de 2013, con una precipitación registrada de 153.7 mm y que propició algunas inundaciones en el municipio de Xalapa, producto del Ciclón Tropical Barry, mismo que en la Región Montañosa Central de Veracruz ocasionó 63 eventos por desastres hidrometeorológicos de inundaciones y/o deslaves reportados ante el Centro Nacional de prevención de Desastres (CENAPRED, 2020); incluso, las precipitaciones máximas registradas para esa fecha en la región fueron en localidades como Misantla, con 372.0 mm; Libertad, con 312.5 mm; Citlaltépetl con 310.0; Actopan y Acatlán, con 296.5 mm (Luna Díaz Peón, 2019).

Un año antes, el 9 de agosto de 2012, también hubo un registro extraordinario de 150.3 mm ocasionado por la Tormenta Tropical Ernesto, que provocó inundaciones en algunos puntos del municipio de Xalapa.

Figura 6. Estación climatológica 30228 JALAPA DE ENRÍQUEZ (DGE)



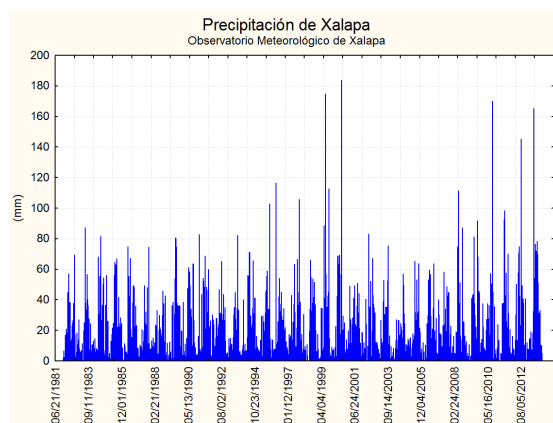
Fuente: elaboración propia con información del SMN (SMN, 2020).

Los registros del Observatorio Meteorológico de Xalapa con los que se cuentan datan desde el 1º de enero de 1982. Aunque como resultado de esta investigación se encontró que este observatorio fue fundado el 9 de noviembre de 1893 por acuerdo del Sr. Gobernador Constitucional Don Teodoro A. Dehesa, se desconoce, hasta el momento, qué fue de la información no encontrada (SMN, 2020a). A pesar de que se solicitó dicha información bajo oficio (19 de junio de 2020), sólo se pudo contar con datos hasta el 2012, resaltando uno de los problemas con los que se enfrentan

al solicitar la información, pues esta no es entregada completa y en la mayoría de los casos no se explican los motivos de la falta de dicha información.

De los registros destacan 10 datos que rebasaron los 100 mm, resaltando dos fechas importantes para el municipio de Xalapa, que fueron el 5 de octubre de 1999 con un registro de precipitación de 112.8 mm —durante ese evento municipios como Perote y Las Vigas sufrieron de inundaciones, deslaves y pérdidas humanas, producto de la interacción de un frente frío y una depresión tropical (Luna & Acevedo, 2006)—, y la del 17 de septiembre de 2010 con el paso del Huracán Karl (Luna & Rivera, 2012), registrando 170.2 mm entre los máximos, al igual que la estación 30135.

Figura 7. Observatorio Meteorológico de Xalapa con número de identificación internacional 76687



Fuente: elaboración propia con información del SMN (SMN, 2020).

Conclusiones

Con la realización de esta investigación se puede concluir que existe variabilidad entre los años de registro. Además, la información de datos de precipitación que se genera actualmente no es suficiente para determinar la intensidad y frecuencia con la que se inundan todas las zonas del municipio de Xalapa, lo que ha permitido una percepción errónea sobre lluvias nunca registradas.

Recomendaciones

Se recomienda que al utilizar bases de datos se consideren todos los puntos y verificar, entre otros aspectos, la ubicación y una inspección física. Con base en

los problemas presentados en este trabajo se propone conformar una base de datos completa para el municipio de Xalapa a partir de las ya existentes, la cual se pondría a disposición de los usuarios permitiendo una consulta rápida. Esta información se validaría a través de tratamientos estadísticos y estaría en un portal de Internet, dicha información se actualizaría periódicamente. Con lo anterior se pretende contar con un banco de datos meteorológicos confiables de alta calidad y estar con ello a la vanguardia de la investigación para el municipio de Xalapa.

Referencias bibliográficas

- Al calor político. (2020). *Lluvias de septiembre y octubre rebasan promedios históricos: CONAGUA*. <https://www.alcalorpolitico.com/informacion/lluvias-de-septiembre-y-octubre-rebasan-promedios-historicos:-conagua-248596.html#.X9O3n-vlKi70>
- Ayuntamiento de Xalapa, H. (2020). *Solicitará Xalapa declaratoria de emergencia por lluvia*. <https://ayuntamiento.xalapa.gob.mx/home/-/blogs/xalapa-declaratoria-de-emergencia-por-lluvia/maximized>
- CENAPRED. (2020). *Centro Nacional de Prevención de Desastres*. <https://www.gob.mx/cenapred>
- Diario de Xalapa. (2020). *Lluvia deja inundaciones en varias colonias de Xalapa*. <https://www.diariodexalapa.com.mx/local/video-lluvia-deja-inundaciones-en-varias-colonias-de-xalapa-temporada-de-lluvias-clima-anegaciones-afectados-5660296.html>
- Luna, A., & Acevedo, F. (2006). Principales fenómenos meteorológicos que afectaron al estado de Veracruz en el año 2005. En A. Tejeda Martínez & C. Welsh Rodríguez (Eds.), *Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz* (2006th ed., p. 388). Universidad Nacional Autónoma de México. <http://www.librosoa.unam.mx/xmlui/handle/123456789/1370>
- Luna, A., & Rivera, D. (2012). Los ciclones tropicales en Veracruz y sinopsis del huracán Karl. En 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. (2019). *Análisis de la red climatológica del estado de Veracruz y propuestas de estimación de precipitación para eventos por riesgos hidrometeorológicos*. El Colegio de Veracruz.
- Luna Díaz Peón, A., Valdés Rodríguez, O. A., & Villanueva Solís, J. (2018). Información climatológica de Veracruz, México. En N. Hernández Cortez, L. C. Ruelas Monjardín, & M. E. Nava Tablada (Eds.), *Sustentabilidad del desarrollo: desafíos y propuestas* (1st ed., p. 10). <http://colver.com.mx/2018/SustentabilidadDesarrollo.pdf>
- NOAA. (2020). *National Hurricane Center*. NOAA. <https://www.nhc.noaa.gov/data/>
- OMM. (2020). *Organización Meteorológica Mundial*. Observatorios Meteorológicos. <https://public.wmo.int/es>
- SMN. (2020a). *Historia del Servicio Meteorológico Nacional*. <https://smn.conagua.gob.mx/es/smn/historia#:~:text=El Observatorio Meteorológico y Astronómico,mismo año%2C durante el gobierno>

SMN, S. M. N. (2020b). *Información Estadística Climatológica*. Comisión Nacional del Agua. <https://smn.conagua.gob.mx/es/>

Capítulo XV

Compendio de datos bioclimáticos para la ciudad de Puerto Vallarta

*Antonio Velázquez Ruiz¹, Fátima Maciel Carrillo González¹,
Luis Manuel Martínez Rivera², Leonardo Quirino Olvera³*

¹ Profesor Investigador del Centro Universitario de la Costa. Universidad de Guadalajara. Dirección electrónica: antonio.vruiz@academicos.udg.mx

² Profesor Investigador del Centro Universitario de la Costa Sur, Universidad de Guadalajara. ³ Universidad Veracruzana. Cto. Aguirre Beltrán S/N. Zona Universitaria, 91090. Xalapa Enriquez, Ver.

Resumen

Para subsanar la necesidad de contar con información bioclimática, como apoyo en el análisis y diseño arquitectónico de espacios urbanos en la ciudad de Puerto Vallarta, se presenta este compendio de datos bioclimáticos que integra gráficas de fácil lectura e interpretación de variables atmosféricas (temperatura, precipitación, humedad relativa, viento y radiación solar). La serie de datos abarca de marzo de 2010 a diciembre 2017, que corresponden a una estación meteorológica automática de la marca DAVIS, modelo Vantage PRO-PLUS II ubicada en esta ciudad. Los resultados muestran que la temperatura media anual tiene una oscilación térmica de 8.6°C. Se pueden diferenciar tres periodos térmicos: el período frío, de enero a abril (temperatura promedio de 22.6 °C); el período cálido, de junio a octubre (temperatura promedio de 28.1 °C); y dos períodos de transición, que comprenden los meses de mayo, y noviembre-diciembre. La humedad relativa promedio anual es de 75.4% (mínima de 59.4% y máxima de 91.4%). Se presenta una temporada húmeda muy definida de junio a octubre, con 1061 mm de precipitación promedio, y una temporada seca de enero a mayo y noviembre-diciembre, con precipitaciones promedio de 98 mm. Los vientos están dentro del rango de 0.9 a 1.5 m/s. Se recibe en promedio 5000 W/m²-día de radiación solar, sobre el plano horizontal con tiempo despejado. Se pretende que esta información bioclimática básica sea de utilidad para el diseño y construcción de espacios de confort humano y que sean amigables con el entorno natural.

Palabras clave: *Datos bioclimáticos, Puerto Vallarta, México.*

Introducción

La salud del hombre depende en gran medida de los efectos directos de su ambiente (Olgyay, 1962). Debido a que las condiciones climáticas no se comportan de forma homogénea en el sistema terrestre, el conocimiento de las condiciones locales del clima debe ser un aspecto fundamental para tener en cuenta durante la fase de diseño de cualquier edificación (Granados, 2006). Por ello, una adecuada arquitectura bioclimática debe ser aquella que logre integrar técnicas que favorezcan una reducción del consumo energético, una adaptación al clima del lugar y un aprovechamiento máximo de los recursos disponibles. La eficiencia energética en la arquitectura y el urbanismo estará ligada a un conocimiento específico de las condiciones climáticas relativas de las cuatro variables meteorológicas fundamentales, las cuales son: la radiación solar, la temperatura, el viento y la humedad que, junto con la precipitación, comprenden los elementos climáticos que determinan el estado medio de la atmósfera de un lugar determinado (Neila, 2014). Para poder definir las condiciones que determinan la modelación bioclimática en un determinado lugar, se debe disponer de observaciones medidas de las variables antes mencionadas y recogidas en forma de datos de series de tiempo para luego ser interpretadas mediante gráficos que podrán utilizarse posteriormente en un análisis más detallado para el diseño y construcción de futuros asentamientos que coadyuven al confort humano, así como la conservación de los ecosistemas locales de la ciudad de Puerto Vallarta.

Zona de estudio

La ciudad de Puerto Vallarta es la segunda zona económica más importante del Estado de Jalisco y el 3er lugar en nivel de importancia turística y desarrollo económico de México, con una población de 255,681 habitantes (Municipios de México, 2018, INEGI 2010) y una afluencia turística de 5 millones por año, es el tercer puerto más importante de México y ha tenido en los últimos 20 años un crecimiento promedio de 10,000 casas habitación cada cinco años (INEGI 2010, 2000, 1990).

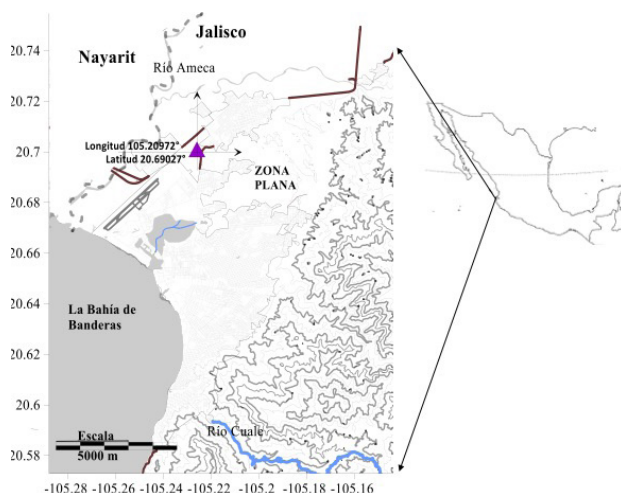
Puerto Vallarta se encuentra ubicada en la región de La Bahía de Banderas, formando parte de la planicie costera del Pacífico Mexicano. El municipio está localizado en las coordenadas de 20° 27'00" a los 20° 59'00" latitud norte y de 104° 55'00" a los 105° 33'00" longitud oeste. Con una extensión de 1300.7 km², limita al norte y noroeste con el estado de Nayarit, al sur con el municipio de Cabo Corrientes y Talpa de Allende; al oriente con San Sebastián del oeste y Mascota, y al occidente con La Bahía de Banderas y el Océano Pacífico (figura 1). La urbanización principal se localiza en la zona costera del municipio y en la margen

derecha del río Ameca (Municipios de México 2018; Gobierno Municipal de Puerto Vallarta, 2015-2018).

El municipio cuenta con muy pocas zonas planas, estas se localizan principalmente en el margen derecho del río Ameca y, por la costa, desde su desembocadura hasta el Cuale. La mayor parte de la superficie está ocupada por zonas accidentadas (ver figura 1), al oriente las sierras de San Sebastián y de El Cuale, que forman parte de la Sierra Madre Occidental y que protegen a la ciudad de los vientos y sirven como moderadores del clima. La Sierra de El Cuale llega hasta la costa formando acantilados, empezando al sur de la cabecera municipal y continúa más al sur hasta formar la Sierra de Cabo Corrientes. Las principales alturas son: el Picacho de Palo María de 1,600 metros, el Cerro de la Aguacatera, de 1500, y la Torrecilla de 1250 metros sobre el nivel del mar (Gobierno Municipal de Puerto Vallarta, 2015-2018).

El clima de Puerto Vallarta corresponde al cálido subhúmedo (Aw) en la zona costera por debajo de los 700 msnm (Velázquez, *et al.*, 2012). Las temperaturas promedio mensuales máximas son de 32.5 °C en verano y mínimas de 16.9 °C en invierno. La precipitación media anual fue de 1157.4 mm. Los vientos dominantes fueron principalmente del noreste, del este-noreste, del sur y no presentan heladas.

Figura 1. Ubicación. La zona plana, que es susceptible de ser urbanizada, se localiza principalmente al norte de la ciudad de Puerto Vallarta (Dirección de Planeación Urbana Municipal, Ayuntamiento de Puerto Vallarta, Jal. (2012), (*Plan Parcial de Desarrollo Urbano del Distrito Urbano 2 y 3*). INEGI, Servicios, Mapa digital de México



Datos

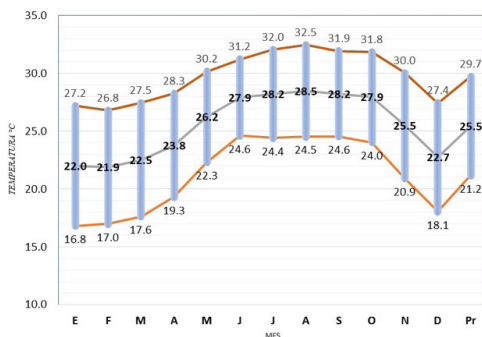
Se utilizó la base de datos del período de marzo 2010 a diciembre 2017, de la estación meteorológica automática Marca DAVIS modelo Vantage ProPlus-2 “CUC”, localizada en las coordenadas 20° 41' 25" de latitud norte y 105° 12' 35" de longitud oeste. Esta estación registra datos de temperatura, humedad relativa y viento. Se tomaron datos de la estación mencionada por estar ubicada en la zona que todavía es urbanizable y por tener calidad y continuidad en sus datos.

Para el análisis y representación gráfica de este compendio de datos bioclimáticos se siguieron las pautas del Análisis Bioclimático de la ciudad de Guadalajara de Arias y Ávila (2004).

Temperatura

El confort térmico representa la temperatura que siente una persona frente a una determinada combinación de la temperatura del aire, la humedad, la velocidad del viento (Granados, 2006) y la radiación (Critchfield, 1974). Estas variables no se comportan de forma homogénea en el sistema terrestre, por lo cual el conocimiento de las condiciones locales del clima es un aspecto fundamental a tener en cuenta durante la fase de diseño de cualquier edificación. Por ejemplo, en días claros, en que el monto de radiación entrante es mayor, la radiación saliente libre produce un amplio rango de temperaturas, mientras que la variación en días nublados es menor, y lo mismo es para una base estacional (Olgyay, 1962). De acuerdo con la clasificación climática de García E. (2004), Velázquez *et al.*, (2012), Puerto Vallarta se clasifica en los cálidos (Aw) con temperatura máxima promedio anual de 28.1 °C (agosto) y mínima de 21.1 °C (marzo); esto es, su temperatura media anual del mes más frío es superior a los 18 °C (figura 2 y tabla 1).

Figura 2. Temperatura promedio mensual (°C).



Elaboración propia.

La oscilación anual de las temperaturas medias mensuales; esto es, la diferencia de temperatura media entre el mes más cálido y el más frío, es de 6.6. Por su parte, la oscilación térmica promedio mensual anualizada es de 8.6°C (tabla 1).

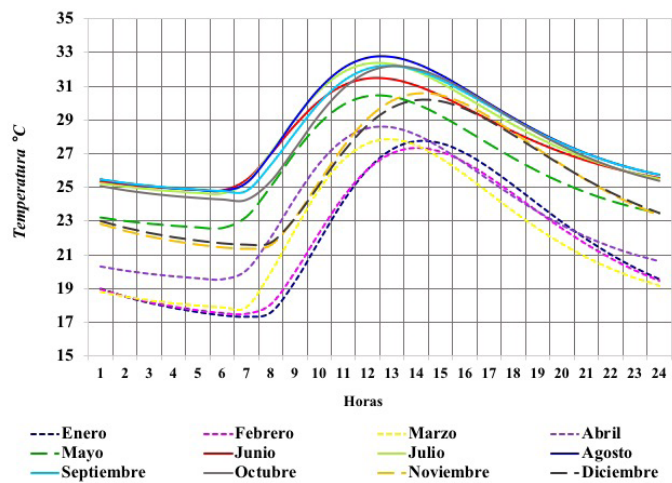
Tabla 1. Oscilación térmica promedio mensual, en °C

E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	Pr
10.4	9.8	9.8	9.0	7.8	6.6	7.6	7.9	7.4	7.8	9.1	9.4	8.6

Elaboración propia.

El mes con menos oscilación térmica es junio, que marca el inicio del período cálido, y el de mayor oscilación térmica es enero, que marca el inicio del período frío (tabla 1).

Figura 3. Temperatura horaria (°C). Se pueden diferenciar tres grupos de meses que marcan los tres períodos térmicos: enero, febrero, marzo y abril, período frío (temperatura promedio de 22.3 °C); junio, julio, agosto, septiembre y octubre, período cálido (temperatura promedio de 27.8 °C); mayo, mes de transición entre el período frío y cálido, noviembre y diciembre, meses de transición entre el período cálido y frío (Gómez-Azpeitia, hoja de cálculo, 2016. D.R.)



De acuerdo con la carta bioclimática de Olgyay (1962), modificada para climas cálidos por Szokolay (2004), la ciudad de Puerto Vallarta se puede considerar fuera de la zona térmica de confort (21 a 30 °C), en las horas del mediodía entre julio y octubre (figura 4).

Figura 4. Mapa de isotermas horarias. Las temperaturas más cálidas se presentan en los meses de junio, julio, agosto y septiembre con temperaturas promedio mayores a los 29 °C, entre las 10:00 y las 16:00 horas. Las temperaturas más frías se presentan en los meses de enero y febrero con temperaturas promedio mensuales de 17.6 °C entre las 5:00 y las 7:00 horas, antes de la salida del sol. Las dos líneas gruesas marcan la hora promedio mensual de la salida y puesta del sol

hr	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
0	19.6	20.1	21.1	22.6	24.8	26.3	26.2	26.4	26.2	26.1	23.2	20.5
1	19.2	19.6	20.8	22.1	24.5	26.1	25.9	26.0	25.9	25.7	22.8	20.2
2	18.7	19.2	20.5	21.6	24.2	25.9	25.7	25.8	25.7	25.4	22.4	19.8
3	18.3	18.7	20.2	21.2	24.0	25.6	25.4	25.5	25.5	25.1	22.1	19.4
4	18.0	18.3	19.8	20.7	23.7	25.5	25.2	25.3	25.3	24.9	21.8	19.1
5	17.7	17.9	19.5	20.3	23.4	25.3	25.0	25.1	25.1	24.6	21.5	18.8
6	17.4	17.6	19.1	19.9	23.2	25.3	24.9	25.6	25.0	24.4	21.3	18.6
7	17.3	17.4	18.9	20.0	23.6	25.7	25.1	25.1	25.1	24.4	21.5	18.4
8	18.0	18.2	19.9	21.8	25.2	26.8	26.1	26.2	26.0	25.6	22.8	19.2
9	20.2	20.3	22.2	24.2	26.9	28.0	27.6	27.8	27.6	27.5	25.0	21.1
10	22.8	23.1	24.2	26.0	28.2	29.0	29.1	29.5	29.2	29.4	27.2	23.4
11	25.0	25.1	25.5	26.9	28.8	29.7	30.3	30.8	30.5	30.7	28.7	25.3
12	26.1	25.9	26.0	27.2	28.8	29.9	30.7	31.4	30.9	31.1	29.3	26.4
13	26.3	25.9	26.0	27.2	28.7	29.9	30.8	31.6	31.1	31.0	29.2	26.6
14	26.2	25.7	25.8	27.2	28.6	29.8	30.7	31.5	31.0	30.9	29.0	26.5
15	25.9	25.4	25.6	27.1	28.5	29.6	30.4	31.2	30.6	30.7	28.6	26.2
16	25.6	25.1	25.3	26.8	28.2	29.2	29.8	30.7	30.1	30.2	28.2	25.8
17	25.0	24.7	24.9	26.4	27.8	28.7	29.3	30.0	29.4	29.7	27.6	25.3
18	24.2	24.0	24.3	25.9	27.2	28.2	28.7	29.3	28.8	29.0	26.8	24.5
19	23.3	23.2	23.3	25.1	26.5	27.7	28.1	28.6	28.1	28.3	26.1	23.7
20	22.5	22.7	23.0	24.6	26.0	27.2	27.5	27.9	27.6	27.7	25.4	22.9
21	21.6	22.1	22.6	24.2	25.8	26.9	27.1	27.4	27.2	27.3	24.7	22.2
22	20.9	21.4	22.1	23.7	25.5	26.7	26.7	27.0	26.8	26.8	24.1	21.5
23	20.2	20.7	21.6	23.2	25.2	26.5	26.5	26.6	26.5	26.4	23.6	21.0

Elaboración propia.

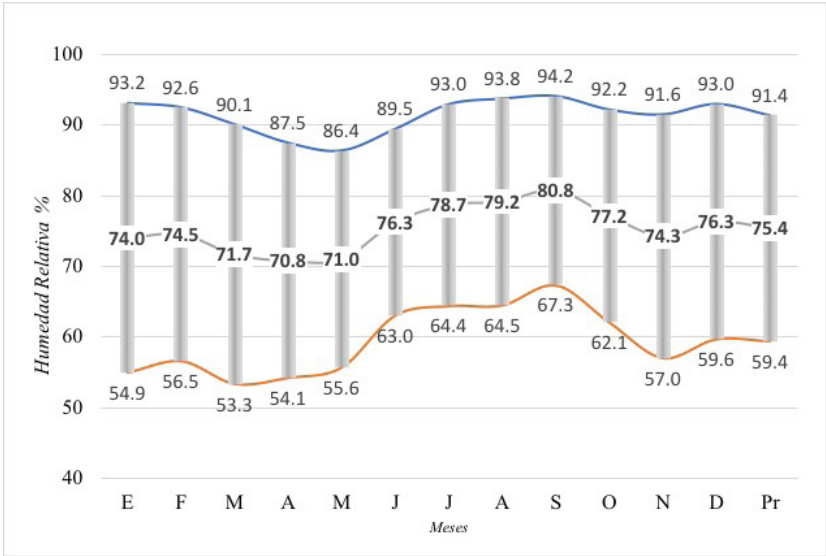
Olgyay (1998) menciona que la base para la definición de la zona de confort térmica fue los resultados de las investigaciones de varios autores. Bedford T. (1950) sitúa la temperatura interior ideal en 18°C durante el invierno y define una zona de confort entre los 13 y 23°C. El estándar alemán se sitúa en 20.8°C, con un 50% de humedad relativa (Markham, 1947), mientras que Yaglou (1947) desarrolló un método para mejorar la temperatura efectiva, basándose en la temperatura media de la piel. Szokolay (2004) menciona que el rango para la zona de confort aceptable sería $\pm 2.5^{\circ}\text{C}$ de la temperatura de neutralidad (T_n), " $T_n = 17.6 + 0.31 \times T_{mm}$ ", donde T_{mm} la temperatura media del mes. Los coeficientes de la ecuación están basados en el trabajo de Auliciems (1981), que ofreció un modelo psico-fisiológico de percepción

térmica, el cual es la base del modelo de adaptabilidad. En 1953 Olgyay introduce la carta bioclimática, donde la temperatura del bulbo seco aparece en el eje vertical y la humedad relativa en el eje horizontal. De acuerdo con esta carta, la zona de confort para Puerto Vallarta sería para temperatura, entre 21.5 y 28.5°C, y para humedad relativa, entre 30 y 65%. Y en este rango estarían los meses de diciembre, enero, febrero, marzo y abril, pero habría que tomar en cuenta la humedad relativa a continuación.

Humedad relativa

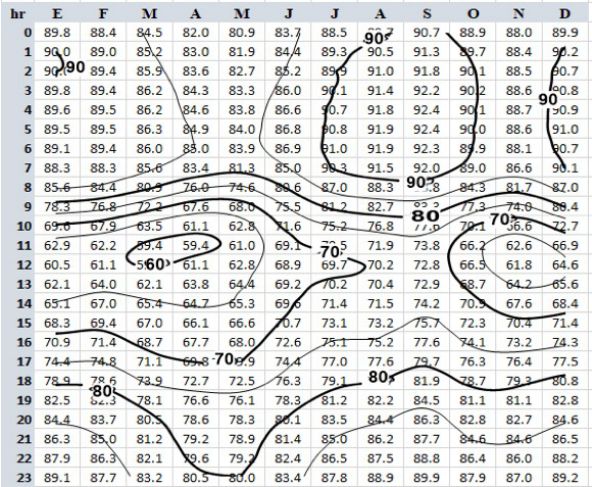
Se conoce como confort hídrico a la comodidad con la humedad del ambiente (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2012). Cuando la humedad relativa es baja, la piel se reseca, sentimos más sed; en cambio, cuando es alta, nos sentimos incómodos, porque no podemos transpirar adecuadamente y el sudor nos ayuda a regular la temperatura de nuestro organismo. Siendo Puerto Vallarta una zona tropical y costera, los niveles de humedad son altos, entre 73 y 81% de humedad promedio mensual (figuras 5 y 6).

Figura 5. Humedad relativa mensual (%). En la ciudad de Puerto Vallarta la humedad relativa promedio anual es de 75.4%. El valor promedio de las humedades relativas máximas es de 91.4% y de los valores promedio mínimos son de 59.4%. Se observa una mayor amplitud de la humedad relativa en los meses de enero a mayo y en noviembre; y menor, de junio a septiembre



Elaboración propia.

Figura 6. Mapa de isohígras horarias. En general, la humedad relativa para esta zona es igual o superior al 60% que marca la norma como límite superior de confort humano (*ANSI/ASHRAE Standard 62-2001(2003)* y *ANSI/ASHRAE Standard 62.1 – 2004 (2005)*)

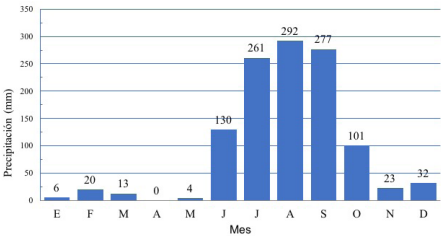


Elaboración propia.

Precipitación

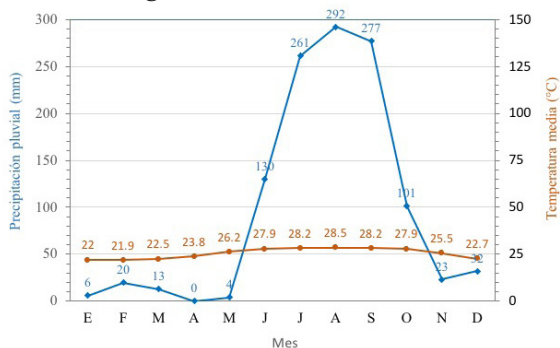
La precipitación está influenciada por varios factores climáticos y meteorológicos, como la dinámica atmosférica, el relieve y la evaporación (Velázquez *et al.*, 2012). Entre los fenómenos meteorológicos destacan la temporada de ciclones tropicales que traen humedad a la zona de Puerto Vallarta y que, al interaccionar con el relieve accidentado en el que se ubica la zona, generan las lluvias del temporal húmedo.

Figura 7. Precipitación mensual (mm). En Puerto Vallarta se presenta la temporada húmeda de junio a octubre, con 91.7% de la precipitación promedio anual. La temporada seca se presenta de noviembre a mayo



Elaboración propia.

Figura 8. Índice Ombrotérmico



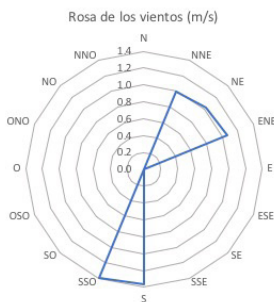
Elaboración propia.

La temporada húmeda se presenta de junio a octubre, con 1060.9 mm en promedio anualizado. Por su parte, la temporada seca se presenta de enero a mayo y en los meses de noviembre y diciembre, con 96.1 mm. No se presentan nevadas. Los veranos son calurosos con temperaturas superiores a los 27 °C en promedio mensual, y los inviernos suaves, con temperaturas superiores a los 21 °C de promedio mensual. La oscilación térmica anual es de 6.2°C.

Viento

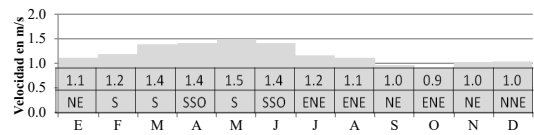
La velocidad del viento en la zona de estudio no es significativa para la generación eólica de energía eléctrica. El efecto direccional de las ventanas puede mejorar la situación de flujo de aire donde el terreno circundante puede tener efecto en el acondicionamiento de aire (Olgyay, 1962).

Figura 9. En promedio, los vientos predominantes, en la zona de estudio, son desde el NE y desde el S-SSO



Elaboración propia.

Tabla 2. En la ciudad de Puerto Vallarta los vientos máximos son en el rango de 1.2 a 1.5 m/s (entre los mese de febero a julio). Estos vientos no son significativos para el aprovechameinto en energía elólica



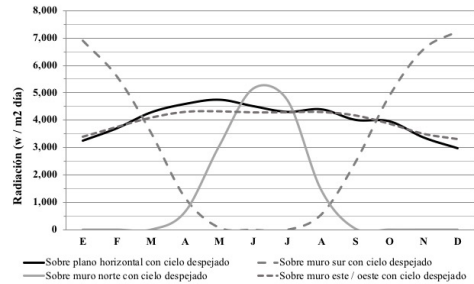
Elaboración propia.

En orden para evaluar el diseño de asentamientos, considerando los efectos del viento en las condiciones de confort, se presenta en esta gráfica la dirección y velocidad promedio mensual del viento para la estación CUC, Puerto Vallarta. Los vientos predominantes de barlovento son principalmente desde el NE-ENE, que comprende los meses de julio a enero con 1.04 m/s en promedio (58.33% de los vientos anuales). Por otra parte, se presentan vientos predominantes de barlovento desde el S-SSO, en los meses de febrero a junio, con un promedio de 1.3 m/s (41.67% de los vientos anuales). Estos vientos están dentro del rango de 0.83 a 1.67 m/s, que se considera agradable (Olgyay, 1962 y Szokolay, 2004).

Radiación

La radiación solar es el factor fundamental. La radiación solar calienta el aire sobre el área terrestre que lo absorbe. Esto provoca diferentes grados de humedad, nubosidad y precipitación, al incidir sobre superficies de agua que se evapora. Luego se producen movimientos desequilibrados de masas de aire que dan lugar a los vientos.

Figura 10. La radiación incidente promedio anual en Puerto Vallarta es de ~5000 W/m²-día, sobre el plano horizontal con tiempo despejado. Esto favorece el diseño de alimentación de energía eléctrica mediante el uso de paneles solares (Gómez-Azpeitia, hoja de cálculo, 2016. D.R.)



Conclusiones

Este compendio de datos bioclimáticos es un primer trabajo, que se ha elaborado para cubrir la necesidad de información bioclimática básica para propósitos de diseño y construcción de espacios sustentables y de confort humano.

De acuerdo con los datos de este compendio bioclimático, para Puerto Vallarta se presentan características de un clima caluroso y húmedo a lo largo del año. Se pueden observar al menos dos estaciones diferentes al año (Gómez-Azpeitia, 2016).

La primera temporada abarca los meses de: mayo, junio, julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre y se caracteriza como una estación de clima caluroso y húmedo. Sus principales indicadores son:

Temperatura promedio: 27.0 °C

Precipitación mensual promedio: 140 mm

Humedad relativa promedio: 77.7%

La segunda temporada abarca los meses de: enero, febrero, marzo, abril, y se caracteriza como una estación de clima templado y húmedo. Sus principales indicadores son:

Temperatura promedio: 22.3 °C

Precipitación mensual promedio: 9.8 mm

Humedad relativa promedio: 73.7 %

Referencias bibliográficas

- ANSI/ASHRAE Standard 62-2001. 2003. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., ISSN 1041-2336, pdf. 13 pp.
- ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2004. 2005. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., ISSN 1041-2336, pdf.
- Arias Orozco, Silvia y David Carlos Ávila Ramírez (2004). *Análisis bioclimático de la ciudad de Guadalajara*. Coordinación editorial, Universidad de Guadalajara. 70 pp. ISBN 968-895-788-7.
- Auliciems, A (1981): Towards a psycho-physiological model of thermal perceptions. *Int. J. of Biometeorology*, 25:109–122.
- Bedford, T. (1950). Environmental Warmth and Human Comfort. *British Journal of Applied Physics*, Febrero 1950, pp. 33-38.
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2012). Criterios Ambientales para el diseño y construcción de vivienda urbana. Unión Temporal Construcción Sostenible S. A. y Fundación FIDHAP (Consultor). Bogotá, Colombia. 200 pp. ISBN: 978-958-8491-58-5.
- Critchfield, H. (1974). Climate and human confort. General Climatology. Prentice-Hall.
- Dirección de Planeación Urbana Municipal, Ayuntamiento de Puerto Vallarta, Jal. (2012). Plan Parcial de Desarrollo Urbano del Distrito Urbano 2. Documento Técnico. H. Ayuntamiento de Puerto Vallarta, Jalisco, 2010-2012. 306 pp.
- Dirección de Planeación Urbana Municipal, Ayuntamiento de Puerto Vallarta, Jal. (2012). Plan Parcial de Desarrollo Urbano del Distrito Urbano 3. Documento Técnico. H. Ayuntamiento de Puerto Vallarta, Jalisco, 2010-2012. 342 pp.
- García, E. (2004). Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen, Serie Libros, núm. 6, Instituto de Geografía, UNAM, México. 90 pp. ISBN 970-32-1010-4
- Gobierno Municipal de Puerto Vallarta (2015-2018). [<http://www.puertovallarta.gob.mx/2015-2018/Ciudad/localizacion.php>: 30 de octubre de 2017].
- Gómez-Azpeitia Gabriel (2016). Bioclimarq, hoja de cálculo. D.R.
- Granados, H. (2006). Principios y estrategias del diseño bioclimático en la arquitectura y el urbanismo: eficiencia energética. Consejo Superior de los Colegios de Arquitectos de España. Volumen tres de monografías CATS. 157 pp. ISBN: 84-932711-7-9.
- INEGI. (1990). XI Censo General de Población y Vivienda. [<http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/1990/>: 22 de noviembre de 2017]
- INEGI. (2000). XII Censo General de Población y Vivienda. [<http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2000/default.html>: 22 de noviembre de 2017]

- INEGI. (2010). Censo de Población y Vivienda. [<http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/ccpv/2010/default.html>: 22 de noviembre de 2017]
- INEGI, Servicios. Mapa digital de México.
<http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjIwLjcwMjMyLGxvbjotMTA1L-jE0NjY5LHo6NyxsOmMxMTFzZXJ2aWNpb3N8dGMxMTFzZX-J2aWNpb3M=>
- Markham, S.F. (1947). *Climate and the Energy of Nations*. Oxford University Press. Londres.
- Municipios de México, Jalisco (2018). [<http://www.municipios.mx/jalisco/>: 30 de octubre de 2017]
- Neila González, Francisco Javier (2014). *Miradas bioclimáticas a la arquitectura popular del mundo*. García-Maroto editores S.L. Colección Miradas 1, Madrid. 270 pp. ISBN 978841579387
- Neila González, Francisco Javier (2014). *Condiciones Climáticas*. García-Maroto editores S.L., Madrid. 39 pp. ISBN ebook: 9788415793281
- Olgyay, Victor (1962). *Design with climate. Bioclimatic approach to architectural regionalism*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey. 200 pp.
- Szokolay, Steven V. (2004). *Introduction to Architectural Science the basis of sustainable design*. Architectural Press. An imprint of Elsevier Science. Linacre House, Jordan Hill. Oxford OX2 8DP 200 Wheeler Road, Burlington, MA 01803. 351 pp. ISBN: 0-7506-58495
- Velázquez Ruiz Antonio, Luis Manuel Martínez R. y Fátima Maciel Carrillo González. (2012). “Caracterización climática para la región de Bahía de Banderas mediante el sistema de Köppen, modificado por García, y técnicas de sistemas de información geográfica”. Investigaciones Geográficas, Boletín núm. 79, Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-19. ISSN 0188-4611
- Yaglou, C. P. (1947). Method for Improving the effective Temperature Index, Heating Piping and Air Conditioning. ASHVE Journal Section, p. 131, septiembre 1947.

Conclusiones

En este libro fueron presentadas diversas problemáticas de los sistemas socio-ecológicos donde se tratan aspectos fundamentales para mejorar el conocimiento sobre los desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en este tipo de sistemas, que sirven para apoyar la planeación de la gestión del riesgo con sustento científico. Partiendo de la base conceptual de los sistemas socio-ecológicos, los cuales constituyen unidades bio-geofísicas, y sus interacciones con corporaciones de actores sociales e institucionales, ya sea delimitado espacialmente o delimitado por las funciones particulares de cada institución, los trabajos fueron englobados en diversos ecosistemas y sus problemas en dos vertientes: naturales e inducidos por el ser humano. Las metodologías presentadas son congruentes con las condiciones de México, donde existe una carencia y manejo transparente de información. Asimismo, fueron expuestos temas relacionados con los efectos del cambio climático en sus diversas escalas y perspectivas. En el contexto de los fenómenos hidrometeorológicos y climáticos, es de llamar la atención los resultados del estudio sobre el incremento de la frecuencia de huracanes de magnitud mayor a 4, de fenómenos locales como granizadas y lluvias intensas, producto de los efectos del cambio climático y la concentración de la urbanización, en las regiones del Pacífico, Golfo y sureste de México. Igualmente, el contenido del libro transita entre los problemas relacionados con la gestión, tintes económicos y legales que deben enfrentar los tomadores de decisión ante la falta de apoyos financieros, fundados en políticas públicas acorde con los tiempos actuales; es decir, los trabajos contenidos en el libro sobre gestión de desastres en sistemas socio-ecológicos evidencian las debilidades en las condiciones legales y económicas para enfrentar los problemas antes, durante y después de un evento catastrófico. Son muchas las necesidades del país, la sociedad con mayores índices de marginación permanece aislada, sigue siendo la más vulnerable, lo que quiere decir que los problemas estructurales aún sin resolver son vitales para reducir, evitar y enfrentar los desastres: salud, educación, trabajo, cultura, derechos humanos y tecnología. Esta situación limita los beneficios del conocimiento adquirido de los sistemas socio-ecológicos. También podemos establecer, con base a los trabajos incluidos en este libro, que el enfoque nacional requiere de una integración y visión de social incluyente, para que las experiencias y conocimientos adquiridos a nivel

país, región, estado y municipio, sobre las diversas problemáticas y factores, muchas veces comunes en los diversos sistemas socio-ecológicos, sean de utilidad pública y permitan sostener el equilibrio dinámico y estático de dichos sistemas.

CVU Coordinadores

Dr. Julio Cesar Morales Hernández

Licenciado en Ecología Marina y doctor en Ecología y Manejo de Recursos Naturales y Agrícolas, orientado a fenómenos hidrometeorológicos, especialista en Sistemas de Información Geográfica y su aplicación en riesgos naturales. De 2016-2019 fue miembro del Sistema Nacional de Investigadores “Candidato”. Actualmente, es profesor Investigador Titular “A”, por el Centro Universitario de la Costa de la Universidad de Guadalajara y miembro de la red de investigadores de la Universidad de Guadalajara.

Cuenta con la publicación de 17 artículos científicos, 5 artículos de divulgación, además de la participación en más de 10 capítulos de libro. Ha realizado estancias de investigación en la UNAM, por parte del instituto de Geografía, en la unidad de meteorología del Centro de Investigación Científica de Educación Superior de Ensenada, Baja California CICESE, Universidad Nacional de Colombia con sede en San Andrés y Universidad de Recife en Pernambuco, Brasil. Ha sido profesor invitado en la Universidad de Quintana Roo, Campus Cozumel, Universidad Autónoma de Guerrero, entre otras.

Ha participado como colaborador en 6 proyectos de investigación en monitoreo de eventos extremos en la costa de Jalisco y su relación con el cambio climático financiado para las instituciones: Fondo COETCYT-JAL Y UdeG, REDES-Clim-CONACYT, CUC-UDG, Redes de Cuerpos Académicos PROMEP. Es autor principal del proyecto relacionado con la contaminación del aire y su efecto en la salud en las zonas conurbadas de Puerto Vallarta y monitoreo de eventos extremos sobre las cuencas hidrológicas de Bahía de Bandera relacionados a cuidado del medio ambiente, financiado por PRODEP.

Fue acreedor al premio Colibrí 2018 por el estado de Jalisco por las investigaciones relacionadas a cuidado del medio ambiente. Forma parte de la Red de Desastres Naturales REDESClim de CONACYT de la cual es miembro del Comité Técnico Académico, miembro de la Red Temática Delfín “Cambio Climático” y miembro del cuerpo académico CA-UDG-305 “Estudios de la Ciudad, Arquitectura y Desarrollo”, por parte de la Universidad de Guadalajara.

Actualmente colabora con el Centro de Estudios Meteorológicos de la Costa y el Laboratorio de Ecología, Paisaje y Sociedad con las siguientes líneas de investigación:

- Monitoreo de la Calidad del Aire mediante partículas suspendidas PM10 y PM2.5 y su relación con las enfermedades cardiorrespiratorias en la zona urbana de Puerto Vallarta.
- Perfil de resiliencia ante riesgos naturales en el municipio de Puerto Vallarta.
- Monitoreo de los eventos hidrometeorológicos extremos (ciclones tropicales y tormentas locales severas) y su efecto en la zona costera de Jalisco.
- Analizar el efecto de los incendios forestales sobre la cobertura vegetal y su relación con los sistemas atmosféricos.

Dr. Enrique González Sosa

Ingeniero civil, por la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Especialista en Cuenas Hidrográficas de la FAO- ILLA (Instituto Italo-Latino Americano)-Universidad de Trento, Italia, así como maestro en Ciencias Hidráulicas por la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ). Cuenta con DEA en Ingeniería Mecánica Geofísica y Medio Ambiente (Modelación Hidráulica) de la Université Joseph Fourier Grenoble, Francia y un doctorado en Ingeniería Mecánica Geofísica y Medio Ambiente (Modelación Hidrológica) del Institut National Polytechnique de Grenoble (INPG), Francia.

Profesionalmente ha trabajado en el sector privado y el público en temas relacionados con el agua, y actualmente su posición es Profesor-Investigador en la Facultad de Ingeniería de la UAQ de la Universidad Autónoma de Querétaro. Durante el desarrollo profesional ha realizado trabajos relacionados con los problemas de erosión-sedimentación, evaporación y la interacción turbulenta entre suelo-vegetación-atmósfera, modelando los procesos de la superficie terrestre. Los trabajos involucran estudios experimentales en laboratorio y la modelación numérica de camadas de residuos vegetales en balance de masa y energía superficial, investigación sobre la intercepción de la vegetación de zonas semiáridas y el papel eco-hidrológico de parques urbanos, entre otros. Además, ha participado como investigador invitado durante un año sabático en el Laboratoire d'étude des transferts en hydrologie et environnement (Grenoble, Francia) y en programas de la Comunidad Económica Europea: MUREX (Monitoring the Usable Soil Reservoir Experimentally), les Alpilles-ReSeDA-experiment y en el programa AVUPUR (Assessing Vulnerability of Peri-Urban Rivers) con CEMAGREF en Lyon, Francia. Además, ha sido el líder de los proyectos de investigación financiados por el Consejo Nacional de Tecnología de México (CONACYT).

Dr. Carlos Manuel Welsh Rodríguez

Investigador del Centro de Ciencias de la Tierra de la Universidad Veracruzana, responsable del grupo de investigación “Impactos Locales y Regionales del Cambio Global”. Investigador de tiempo completo repatriado por CONACYT. Becario CONACYT para estancia Postdoctoral en el Centro Nacional de Investigación Atmosférica en Boulder, CO., y con perfil deseable PRODEP-SEP (desde 2006). Miembro del cuerpo académico consolidado “Gestión y Políticas Públicas Ambientales”. Miembro del SNI 2009-2012 y 2014-2018. Nacido en la ciudad de Xalapa, Ver.

Es profesor del programa PNPC-CONACYT maestría en Economía Ambiental y Ecológica, así como del doctorado en Ingeniería (responsable del área de sustentabilidad); y de la licenciatura en Geografía (acreditado por los CIEES con el nivel I).

Fue representante ante CONACYT de la Red Temática de "Desastres asociados a fenómenos hidro-meteorológicos y climáticos", de 2018 a 2020. Revisor del v y vi Informe de evaluación del IPCC. Miembro de la Unión Geofísica Americana (AGU), de la Unión Geofísica Mexicana (UGM), de la cual fue responsable del área de atmósfera en la Mesa Directiva 2016-2017, de la Red de expertos en gases de efecto invernadero (NGGE), del Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE), de la Red Internacional de Indicadores de Sostenibilidad (ISIN) y del Foro de Ciencia e Innovación para la Sostenibilidad.

Ha dictado más de 70 conferencias internacionales y nacionales en relación al paradigma de la sostenibilidad y cambio climático. Asimismo, ha participado en congresos nacionales e internacionales, de 2005 a la fecha. En su obra se cuentan 5 libros, 53 capítulos de libro, 31 artículos y dirección de 20 tesis de grado de licenciatura y posgrado. Ha recibido financiamiento externo para proyectos por concurso, de organismos tales como NSF, INECC, UK Global Fund, MIT, STAR y CONACYT.

Dr. Oscar Frausto Martínez

Licenciado y maestro en geografía con especialidad en manejo y conservación de los recursos naturales por la UNAM. 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 presidente de la Cátedra internacional Stephen Olsen en Manejo Integrado de la Zona Costera.

Director del Observatorio urbano de la Riviera Maya del CONACYT. Sus líneas de investigación se centran en el diseño, uso y desarrollo de indicadores de

sustentabilidad aplicados a diversos contextos territoriales. Ha publicado 16 libros y más de 80 artículos especializados en temas de gestión del territorio. Actualmente es el coordinador académico del doctorado en desarrollo sostenible de la Universidad de Quintana Roo y director de investigación de la unidad académica zona norte de la Universidad de Quintana Roo.

*Gestión de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos
en sistemas socio-ecológicos*

Elaborado en junio de 2021.

Tiraje: 5 ejemplares

La Red de Desastres Asociados a Fenómenos Hidrometeorológicos y Climáticos (REDESClim), del CONACYT, tiene una trayectoria de 10 años de trabajo. Con más de un centenar de integrantes (investigadores, estudiantes, actores gubernamentales, privados y sociales), la REDESClim desarrolla iniciativas de colaboración, con el fin de prevenir desastres a través de la generación de conocimiento y apoyo técnico a nivel local, regional y nacional.

Por medio del proyecto “gestión de riesgos asociados a fenómenos hidrometeorológicos y climáticos en sistemas socioecológicos”, el CONACYT y la Universidad de Guadalajara firmaron el convenio de cooperación para el desarrollo de acciones locales de fortalecimiento a las capacidades locales para la prevención de desastres. El resultado de esta acción se muestra en las experiencias compartidas de 55 autores de 25 instituciones, quienes resaltan el papel del conocimiento y saberes comunitarios en el estudio de los desastres.

Finalmente, se destaca el rigor académico que los investigadores Dr. Julio Cesar Morales Hernández, Dr. Carlos Manuel Welsh Rodríguez, Dr. Enrique Gonzáles Sosa y Dr. Oscar Frausto Martínez coordinarán en bien de la calidad científica de esta publicación y que sirve de referencia para los encargados en prevenir los desastres en México.

Dr. Oscar Frausto Martínez
Representante de la REDESClim – CONACYT
2021 - 2023



ISBN 978-607-437-561-9



9 786074 375619