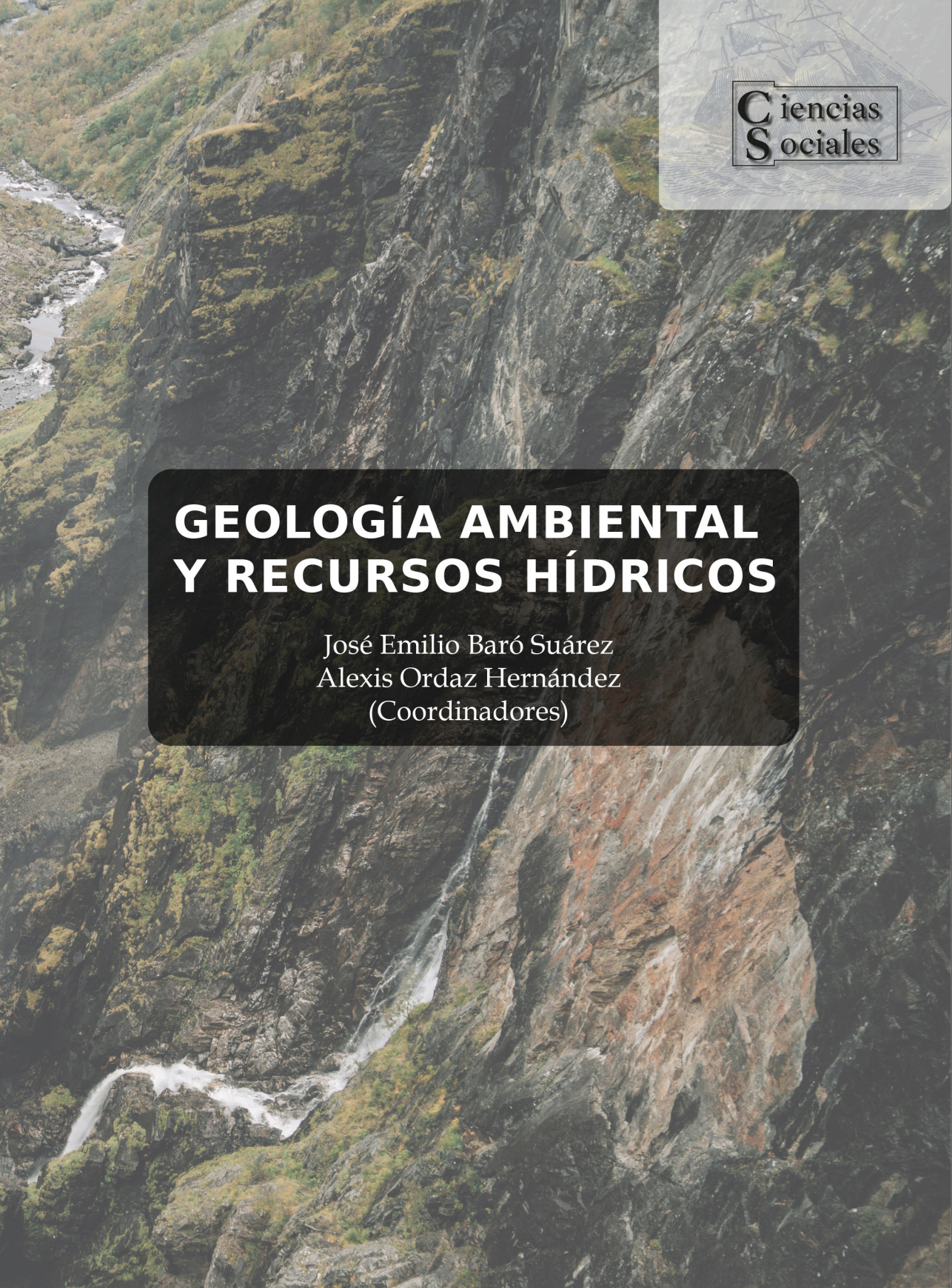


Ciencias Sociales

GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS

José Emilio Baró Suárez
Alexis Ordaz Hernández
(Coordinadores)



José Emilio Baró Suárez

Es ingeniero Geólogo e Hidrogeólogo de Minas por el Instituto Politécnico de Kazajstán, ex URSS; máster internacional en Hidrología General y Aplicada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), España; maestro y doctor en Geografía por el Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Se desempeña como profesor investigador de tiempo completo en la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEMex). Es fundador y ex Coordinador de la Licenciatura en Geología Ambiental y Recursos Hídricos en la misma institución. Es Miembro Honorario del Colegio Mexicano de Profesionales en Gestión de Riesgos y Protección Civil, A. C.; Miembro numerario de la Benemérita Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, Estado de México; Miembro de la Academia Sociales y Humanidades del Estado de México, A. C., y Miembro Honorario de la cátedra de Seguridad y Riesgos de Cuba.

Ha publicado artículos en revistas indexadas, es autor de dos obras y coordinador de cuatro libros. Ha participado en diferentes proyectos de investigación y de consultoría, así como en PRONACES. Sus líneas de investigación son: Análisis, Evaluación y Gestión de Riesgos Socionaturales, Gestión Ambiental y Ordenamiento territorial e impacto ambiental.

Recibió la Distinción al Mérito Geográfico otorgada por el posgrado de Geografía de la UNAM (2010). Fue acreedor al Reconocimiento de la Sociedad Mexicana de Geografía y Estadística, Academia de Geografía: autor de la Mejor Tesis de Doctorado en Geografía Humana, presentada en réplica oral en 2010, además, mereció la distinción al Mejor Trabajo Investigativo en Ciencias Sociales y Humanidades otorgado por la UAEMex y la Federación de Asociaciones Autónomas del Personal Académico (2013) y el Premio Estatal del Medio Ambiente 2014 (Categoría Investigador-Individual) por la Secretaría del Medio Ambiente del Estado de México (2015). Recibió el Premio Ramazzini & Carvalho, 2021, por la formación de recursos humanos en materia de Protección Civil y Gestión Integral de Riesgo por la Asociación de Seguridad Higiene y Protección Civil, A. C.



Alexis Ordaz Hernández

Es doctor en Ciencias Técnicas por la Universidad de Pinar del Río de Cuba. Desde el año 2003 desarrolla la línea de investigación Análisis, Evaluación y Gestión de Riesgos Socionaturales. Labora en la Facultad de Geografía de la Universidad Autónoma del Estado de México como profesor investigador de tiempo completo. Cuenta con el Reconocimiento a Profesor de Tiempo Completo con Perfil Deseable que otorga la SEP.

En el año 2011 fue Premio Provincial de la Academia de Ciencias de Cuba. Actualmente, forma parte del Sistema Nacional de Investigadoras e Investigadores (SNII), Nivel I. Ha publicado treinta artículos en revistas indexadas, varios capítulos para libros y participó en la coordinación de dos libros. En su labor investigativa realiza numerosos aportes a la Reducción del Riesgo de Desastres, que tributan a la toma de decisiones en espacios geográficos con concentración de población e infraestructura expuesta a amenazas.

Su obra se enfoca en contribuciones al Programa Nacional Estratégico (PRONACES) en Sistemas Socioecológicos y Sustentabilidad que impulsa en el CONAHCYT.

GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS

GEOLOGÍA AMBIENTAL Y RECURSOS HÍDRICOS

Jose Emilio Baró Suárez
Alexis Ordaz Hernández
(Coordinadores)

iidear
Instituto de Investigaciones y de Estudios sobre Alertas y Riesgos
Sociedad Hidrológica de Calimaya A.C.
DESDE 1987 REDSW
RED SISMOLOGICA DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO
Universidad del Valle
Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano - OSSO
Hacia una proyección Social
Colegio Mexicano de Profesionales en Gestión de Riesgos y Protección Civil A.C.
RETESyG
CONACYT
Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
CROMBERGER
EDITORES E IMPRESORES
Arte en impresión editorial

Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tecnologías (Conahcyt)
Registro Nacional de Instituciones y Empresas Científicas y Tecnológicas
Registro: 2000845

1a. edición: 2023

© Jose Emilio Baró Suárez,
Alexis Ordaz Hernández (coordinadores)

© Cromberger Editores e Impresores, S.A. de C.V.
Río Danubio 69, Despacho 1001
Col. Cuauhtémoc, Alcaldía Cuauhtémoc
06500; Ciudad de México

Las opiniones y puntos de vista expresados en esta obra son responsabilidad única y exclusiva de los autores y no necesariamente representan las opiniones o posiciones de la editorial, y las de sus integrantes.

Esta obra ha sido evaluada por pares académicos ciegos. Libro financiado por los autores del libro y con el patrocinio del Colegio Mexicano de Profesionales en Gestión de Riesgos y Protección Civil A. C. y del Instituto de Investigaciones y de Estudios sobre Alertas y Riesgos. Esta publicación no podrá ser reproducida total o parcialmente, incluyendo el diseño de portada; tampoco podrá ser trasmitida ni utilizada de ninguna manera por algún medio, ya sea electrónico, mecánico, electromecánico o de otro tipo sin autorización por escrito de los autores o editores.

ISBN: 978-607-5892-10-8

Corrección de estilo: Gisela Arriaga Romero
y Juan Fernando Becerril Hernández
Diseño y formación: Armando Arriaga Rivera
Diseño de portada: Aarón González Cabrera

Hecho en México • Made in Mexico

Contenido

Introducción 11

Bloque 1. Geología Ambiental

Capítulo 1 19

Implementación de una red neuronal artificial para la estimación de susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Tenancingo, Estado de México.

Daniel Morales Méndez y Alexis Ordaz Hernández

Capítulo 2 45

Geomorfología costera: metodología para un caso de estudio

Luis Miguel Espinosa Rodríguez, José de Jesús Fuentes Junco y Alexis Ordaz Hernández

Capítulo 3 69

Geomorfología ambiental y su papel en la geografía constructiva

José Ramón Hernández Santana, Ana Patricia Méndez Linares y Luis Miguel Espinosa Rodríguez

Capítulo 4 103

Análisis geomorfológico integral del relieve moderno: una aproximación metodológica para la planeación territorial en cuencas costeras

José Ramón Hernández Santana, Ana Patricia Méndez Linares y Manuel Bollo Manent

Capítulo 5 131

Liderazgo en crisis para emergencias mayores o desastres derivados de riesgos geológicos e hídricos.

Mario Álvaro Ruiz Velázquez

Capítulo 6 151

Identificación de los factores subyacentes de la vulnerabilidad institucional: una reflexión sobre los procesos generadores de riesgo a escala local. Municipio de Santander de Quilichao, Cauca, Colombia

David Alejandro Muñoz y José Emilio Baro Suarez

Capítulo 7 165

Consideraciones metodológicas de diagnóstico en un escenario de riesgos socionaturales: geológicos e hidrometeorológicos

José Emilio Baró Suárez, Francisco Zepeda Mondragón y Armando Arriaga Rivera

Capítulo 8 187

Historicidad sísmica en el valle de Toluca: Calimaya de Díaz González, 1980-2018

Armando Arriaga Rivera y José Emilio Baró Suárez

Capítulo 9 201

Influencia del riesgo en el territorio: una visión para el ordenamiento ecológico territorial en Colombia

David Alejandro Muñoz, José Emilio Baró Suárez, Xanat Antonio Némiga y Elkin de Jesús Salcedo Hurtado

Bloque 2. Recursos Hídricos

Capítulo 10 221

Indicadores de calidad y contaminación del agua

Maria Vicenta Esteller Alberich, Edith Rosalba Salcedo Sanchez, José Luis Expósito Castillo y José Alfredo Flores Ronces

Capítulo 11 247

Pronóstico de corto plazo de la sequía meteorológica

Ricardo Arévalo Mejía, Carlos Díaz Delgado, Aleida Yadira Vilchis Francés y Rocío Becerril Piña

Capítulo 12 273

Estimación de la alteración hidrológica en ríos con aforo hidrométrico

Carlos Díaz Delgado, Ricardo Arévalo Mejía, Carlos Alberto Mastachi Loza y Humberto Salinas Tapia

Capítulo 13 295

Propuesta de un plan de gestión para el suministro de agua potable en Villa Victoria

Aleida Yadira Vilchis Frances y Dafne Luna Pérez

Capítulo 14 317

La influencia de El Niño-Oscilación del Sur en los eventos hidrometeorológicos extremos: Caso Tabasco

Alejandro Jaramillo Moreno, Carla Sabrina Vázquez Jiménez, Christian Domínguez Sarmiento y Leodegario Sansón Reyes

Capítulo 15 335

Regionalización y caracterización climática de la sequía: México

Guadalupe Yolanda Valenzuela Morales, Ricardo Arévalo Mejía, Carlos Roberto Fonseca Ortiz y Marivel Hernández Téllez

Capítulo 16 349

Influencia del cambio del uso de suelo sobre la dinámica de la precipitación. Caso de estudio: Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma, México.

Ana Gabriela Godínez Tovar, Marlen López Gutiérrez, Rocío Becerril Piña y Carlos Alberto Mastachi Loza.

Capítulo 17 365

Estimación de la recarga potencial en el acuífero del Valle de San Juan del Río, Querétaro

Arianna Valle González, Héctor Uriel Zaragoza Contreras, José Luis Expósito Castillo y María Vicenta Esteller Alberich

Capítulo 18 389

Propuesta de un Sistema de Alerta Temprana contra Inundación (SATI) y Logística Humanitaria: Influencia de movimientos gravitacionales en la gestión del riesgo territorial en Colombia.

David Alejandro Muñoz y José Emilio Baro Suarez

Capítulo 19 411

Curvas de daños para la estimación del impacto económico por penetraciones del mar en el Malecón Tradicional de La Habana, Cuba.

Kenia Hernández Valdés, Willian Olivera Azcanio y María de los Ángeles Zamora Fernández

Reflexiones finales 427

Introducción

La Geología ambiental es el empleo del conocimiento geológico en la investigación del medio físico que contribuye al diagnóstico y corrección de la contaminación. Asimismo se ocupa del estudio de los riesgos geológicos e hidrometeorológicos generados por causas naturales como erupciones volcánicas, actividad sísmica, inundaciones, deslizamientos de tierra, avalanchas de barro, erosión, incendios provocados por rayos (tormentas eléctricas), u otros eventos de origen natural.[1]

De su significado se derivan diferentes líneas de capacitación de recursos humanos en temas de ambiente, el impacto de las actividades humanas, el análisis, la evaluación y gestión integral de riesgos socionaturales, tanto de origen geológico como hidrometeorológico.

México es uno de los países en Latinoamérica con fuertes impactos de eventos naturales; 2022 fue marcado por distintos sucesos que ocasionaron daños y pérdidas en todo el territorio nacional; en total, registrándose 509 hechos causados por fenómenos de origen natural, así como derivados de la actividad humana. Se contabilizó, de manera preliminar, los daños y pérdidas sumaron un total de 11 mil 686 millones de pesos y 481 personas fallecidas.[2]

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) afirma que dentro de los eventos más significativos en 2022 se encuentra la temporada de ciclones tropicales, que abarca el período de mayo a noviembre; registrándose 31 eventos (CENAPRED, 2023):

- 17 en el océano Pacífico.
- 14 en el océano Atlántico.

---

1 Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2017). *Geología ambiental*. Gobierno de México. https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Riesgos-geologicos/Geologia-ambiental.html.

2 Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED (2023). *11 mil 686 MDP y 481 defunciones: el saldo de los desastres en 2022*. Gobierno de México. https://www.gob.mx/cenapred/articulos/11-mil-686-mdp-y-478-defunciones-el-saldo-de-los-desastres-en-2022?idiom=es

Asimismo, expone que seis de ellos impactaron en México: cinco en el Pacífico, siendo, Agatha, Kay, Lester, Orlene y Roslyn y uno en el Atlántico (Lisa). En el estado de Oaxaca, el impacto del huracán Agatha, dejó a su paso daños severos en la infraestructura en la zona costera y la sierra sur. Se contabilizaron 19 mil 362 viviendas con algún tipo de daño, y pérdidas preliminares que se estiman en más de 5 mil millones de pesos; otros ciclones tropicales que tambien tocaron tierra fue el huracán Kay en la península de Baja California y el huracán Roslyn en el estado de Nayarit.

Finalmente, CENAPRED señala que en cuanto a los eventos de tipo geológico, el sismo del 19 de septiembre de 2022 de magnitud 7.7 (epicentro al sur de Coalcomán, Michoacán) afectó a Colima de manera preliminar con más de 900 millones de pesos en daños y pérdidas. Un evento más que marcó el 2022, fue el colapso de la mina "El Pinabete" en Coahuila, donde 10 mineros quedaron atrapados y los trabajos para el rescate de los cuerpos se estimaron en 68.7 millones de pesos.

Por lo anterior el conocimiento en esta materia, resulta de extrema importancia para que la población tenga elementos de acción ante una contingencia como ésta y, junto con las autoridades, puedan actuar coordinadamente con protección civil municipal, estatal y federal, de tal manera que minimicen las pérdidas económicas, los daños materiales como aquellos relacionados con la vida humana.

La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) afirma que las cuencas hidrológicas también poseen una relevancia significativa por ser uno de los activos ambientales de impacto para el ser humano. En México, las cuencas son unidades naturales de terreno definidas por la existencia de una división de aguas debido a la conformación del relieve; por ello el propósito de la administración de las aguas nacionales, al 7 de julio de 2016, se tenían contabilizadas 757 cuencas hidrológicas que se dividen el país. Éstas se agrupan en 37 regiones hidrológicas, que a su vez se dividen en 13 regiones hidrológico-administrativas; en lo que respecta a las aguas subterráneas, en enero 14, 2018 se contemplaron 653 acuíferos. De esta manera, la medición del ciclo hidrológico lo realiza CONAGUA en 3,090 estaciones climatológicas y 815 estaciones hidrométricas.[3]

CONAGUA (2019) expone que en México cuenta con una red hidrográfica de 633 mil kilómetros de longitud, donde sobresalen 51 ríos principales en los que fluye el 87% del escurrimiento superficial, cuyas cuencas cubren el 65% de la superficie del país. Las cuencas que sobresalen son Bravo y Balsas, por su longitud destacan el río Bravo y Grijalva-Usumacinta. Los ríos Lerma

3 Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2019). *Situación de los Recursos Hídricos. Gobierno de México*. https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/situacion-de-los-recursos-hidricos

y Nazas-Aguanaval pertenecen al interior de las cuencas. Asimismo, indica que en México la precipitación normal para el período 1981-2010 fue de 739.8 milímetros al año, distribuidos de forma irregular. El 68% del total de la precipitación normal ocurre entre los meses de junio y septiembre, pues en 2017 se tuvo una precipitación anual de 782 milímetros, superior al 5.6% de lo normal.

CONAGUA (2019) señala que la importancia del agua subterránea se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El agua subterránea aportó 34 385 millones de metros cúbicos en el 2017 con diferencia entre el volumen extraído y el descargado en contraposición con usos donde el volumen extraído y el descargado son iguales; como por ejemplo, la generación de energía hidroeléctrica que representó el 39.1% del volumen total concesionado.

Asimismo, CONAGUA (2019) indica que, a partir de 2001 se inició un proceso de delimitación, estudio y determinación de la disponibilidad de los mantos acuíferos. La administración de las aguas nacionales subterráneas, además de las concesiones y permisos, contempla otros instrumentos para preservar el recurso tales como vedas, reglamentos, zonas reglamentadas, rescates y zonas de reserva. En función de la relación extracción/recarga se define si los acuíferos están o no sobreexplotados, variando su condición de acuerdo con los estudios disponibles. A partir de 2001, el número de acuíferos sobreexplotados oscila entre 100 y 106, al cierre de 2017 se tenían 105 acuíferos sobreexplotados, 18 con intrusión marina y 32 bajo el fenómeno de salinización de suelos y aguas subterráneas salobres. Para el 2017 se contaba con 5,028 sitios de monitoreo de la calidad del agua operada por esta comisión nacional en todo el país. Los resultados en 2017, mostraron que tenían una calificación de Excelente en el 53.6% de los sitios.

En cuanto a los resultados fueron los siguientes: la Demanda Bioquímica de Oxígeno a 5 días (DBO5) fue del 18.5%, para la Demanda Química de Oxígeno (DQO) fue de 58.1%, para los Sólidos Suspendidos Totales (SST) y Coliformes Fecales (CF) fueron 24.9%. Para el resto de los sitios, su calificación variaba de Buena Calidad a Fuertemente Contaminada.

Por su parte, el Programa Nacional de Protección Civil 2022 -2024 señala que la falta de prevención y limitada resiliencia de la sociedad, son consecuencia de la actuación reactiva en atención a los daños provocados por los desastres ocurridos; por ello, surge la necesidad de fortalecer la prevención con un enfoque estratégico de gestión integral de riesgo. Aunado a lo anterior, permanece la noción que los desastres son causados por eventos de origen natural que lleva al error de asumir que no son evitables y que poco se puede hacer ante ellos. El CENAPRED señala que existe una perspectiva que permite enfrentar los desastres con el enfoque de la Gestión Integral de Riesgos (GIR), que exige:

Conocer y diferenciar el origen y naturaleza de los eventos, los procesos de cons-

trucción que social; la identificación de peligros y vulnerabilidades ante diversos escenarios; analizar y evaluar los posibles efectos; revisar las estrategias para mitigar el impacto de los fenómenos de origen natural y antrópico; incorporar acciones y mecanismos para la prevención y mitigación de los riesgos, mediante el desarrollo de una mayor comprensión y concientización de éstos, con el fortalecimiento de la resiliencia de la sociedad.[4]

De igual forma, argumenta que la ausencia de la GIR de desastres con alcance nacional, evita el conocimiento del origen y la naturaleza de los riesgos, lo que dificulta la distinción entre peligros y vulnerabilidades a los que se enfrenta la población. Esto provoca omisiones en la planificación de medidas y acciones, la aplicación de mecanismos de prevención así como la mitigación de riesgos; además, limitar la comprensión y toma de conciencia frente a los peligros. Con lo anterior es necesario concretar su implementación en México por medio de estrategias que los integrantes del Sistema Naciona de Protección Civil (SINAPROC) puedan ejecutar bajo la directriz de la GIR en desastres vista como un derecho de la población. Estas estrategias a nivel local, requieren promover la vinculación entre entidades estatales y municipales, así como organizaciones de la sociedad civil y el sector privado, con el objetivo de reforzar las acciones encaminadas a la reducción de la vulnerabilidad en las zonas que presentan mayor amenazas, grado de exposición y rezago social. Un área de oportunidad para lograr una coordinación interdisciplinaria es favorecer la investigación aplicada con la finalidad de buscar soluciones de problemas por parte de las universidades e instituciones a nivel local, bajo un enfoque de transferencia y apropiación social del conocimiento en materia de la GIR.

Con base en lo anterior, el objetivo fundamental de esta obra es plantear una serie de problemáticas en el ámbito de la geología ambiental y manejo de los recursos hídricos, a través de casos de estudio, así como sus soluciones de forma que, el lector tenga una referencia para su formación y desarrollo profesional. En este libro se plantean 15 capítulos que abordan, desde diferentes puntos de vista (teóricos, metodológicos y prácticos) las problemáticas que plantea la geología ambiental y el adecuado menajo y control de los recursos hídricos.

De esta forma, el libro se estructura en dos bloques. El primer bloque (del capítulo 1 al 9) denominado Geología Ambiental, expone propuestas metodológicas a través de casos de estudio, en ámbitos sensibles para la sociedad como son los riesgos por deslizamientos e historicidad símica. También, realiza aportaciones en el contexto de la geomorfología y sus implicaciones en el

4 Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED (2022). *Programa Nacional de Protección Civil 2022 -2024.* Diario Oficial de la Federación (DOF) 05/12/2022. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5673256&fecha=05/12/2022#gsc.tab=0

Ordenamiento Territorial. Además, puede consultar metodologías relevantes en el ámbito de la gestión local del riesgo, donde exponen temas como los diagnósticos de escenarios de riesgos, liderazgo frente a crisis, factores subyacentes de la vulnerabilidad, entre otros.

El segundo bloque (del capítulo 10 al 19) profundiza en las problemáticas como en los enfoques metodológicos para su solución (aspectos vinculados a los Recursos Hídricos). Los recursos hídricos son abordados como un componente principal de los ecosistemas, expuestos a la presión antrópica en la escala local y al cambio climático desde una mirada global. Es así como se decide atender aspectos relevantes al cambio climático, la sequía meteorológica, alteración hidrológica y eventos hidrometeorológicos extremos. También se revisan problemas de contaminación en el agua, la recarga de acuíferos y su gestión. Cierra el bloque con aportaciones en el ámbito de la gestión del riesgo, en este caso, los Sistemas de Alerta Temprana y, por último, incluye el tema de las Curvas de Daños para la estimación del impacto económico por penetraciones del mar en zonas costeras.

Finalmente, expresamos nuestro agradecimiento al grupo de investigadores de nuestra universidad y aquellas, que colaboraron en la materialización de esta obra; la cual, constituye un instrumento importante de consulta y compañía en la formación de estudiantes e investigadores así también para los encargados de promover e implementar políticas públicas territoriales como el público en general deseoso de adentrarse en estos temas.

Dr. José Emilio Baró Suárez
Dr. Alexis Ordaz Hernández
Coordinadores

Bloque 1.
Geología Ambiental

Capítulo 1. Implementación de una red neuronal artificial para la estimación de susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Tenancingo, Estado de México

Daniel Morales Méndez [1]
Alexis Ordaz Hernández [2]

Introducción

En los últimos años hemos sido testigos de una convergencia notable entre dos campos tecnológicos: la inteligencia artificial (IA) y los sistemas de información geográfica (SIG). Ambas disciplinas se complementan pues la IA brinda técnicas avanzadas para proyectos espaciales y los SIG ofrecen una gama diversa de aplicaciones. De esta manera, las redes neuronales artificiales son un recurso valioso para aprender "desde los datos" y adecuar su mapeo a la solución de problemas complejos (Voženílek, 2009). Entre los eventos que requieren de soluciones SIG avanzadas, se encuentran los deslizamientos de tierra. En México, estos procesos son una de las dinámicas geomorfológicas más frecuentes y de mayor impacto en las comunidades; además alteran significativamente el paisaje, los deslizamientos de tierra pues son causa importante de daños en las edificaciones ya que pueden provocar pérdidas humanas cuando se presentan en áreas pobladas (Salinas-Jasso *et al.*, 2018).

Por lo tanto, plantea el desarrollo de una Red Neuronal Artificial (RNA) que evalúa diferentes variables ambientales, geológicas y geomorfológicas relacionadas con deslizamientos de tierra previos en el municipio de Tenan-

1 Maestro en Ciencias del Ambiente. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

2 Doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

cingo (Estado de México). Conforme al aprendizaje de la RNA, se definen áreas susceptibles de deslizamientos a partir de dos modelos: el primero incluye variables cualitativas como cuantitativas, y el segundo estudia variables cuantitativas.

1. Antecedentes y marco teórico

En México, desde 1935 hasta 2017, se han registrado un total de 2997 eventos de remoción en masa, los cuales el 65.6% se clasifican como deslizamientos de tierra y el 93% han sido desencadenados por factores hidrometeorológicos. Bajo este contexto, el Estado de México es una de las diez entidades federativas con más de 100 eventos reportados (Díaz *et al*., 2020). Los deslizamientos de tierra en México se han abordado desde distintos enfoques, entre ellos la evaluación de susceptibilidad y peligro, temas que se ha vuelto primordial en el siglo XXI (Capra *et al*., 2003; Alcántara, 2004; Borja y Alcántara, 2010; Sánchez-Nuñez *et al*., 2012; Jaimes *et al*., 2013; Piña et al., 2019; Ramos-Bernal *et al*., 2019; Chaparro, 2020; Valdez *et al*., 2022). Los avances en la ciencia de la información geográfica (GIScience), teledetección y el desarrollo del modelado numérico de los procesos en la superficie terrestre, han llevado de forma revolucionaria abordar los estudios en Geomorfología (Bishop *et al*., 2012), avances que se ven evidenciados por el aumento de textos que incluyen conceptos geotecnológicos en las investigaciones geomorfológicas (Otto *et al*., 2017).

A pesar de las ventajas que ofrece la aplicación de la GIScience en geomorfología, aún existen limitaciones en su implementación. Uno de los principales desafíos radica en la calidad y disponibilidad de los datos de entrada, lo cual genera errores y aumenta la incertidumbre en los resultados, ya que pone en duda la precisión de los modelos resultantes; además, pueden ser complejos y ofrecer múltiples alternativas, técnicas que dificultan la comparación entre diferentes métodos. Asimismo, existen detalles importantes que, por cuestiones de extensión, no se encuentran publicados, lo cual limita la capacidad de análisis y comparación entre diferentes estudios (Remondo y Oguchi, 2009).

Por ello, se parte del conocimiento de los procesos de remoción en masa desde la perspectiva de la geomorfología sistemática. Dicho proceso refiere la acción de la gravedad para la movilización de materiales en una ladera, sin la influencia predominante de agentes exógenos como el aire, hielo o agua (Dikau, 1996; Hugget, 2007). Así para producirse, requiere una reducción en la resistencia de la ladera o un factor externo que aumente la tensión interna; provocando un efecto de cizalla (Pedraza, 1996). Los procesos de remoción en masa se clasifican según su mecanismo: caídas, deslizamientos, vuelcos, flujos, expansiones laterales, reptación y movimientos complejos (Dikau, 1996). Para fines de este estudio se examinará la susceptibilidad a deslizamientos de

tierra, que son movimientos de masa sobre una superficie de cizalla o corte bien definida (plana o cóncava) (Hungr *et al*., 2013), considerando ambos tipos de deslizamientos de tierra sin diferencia debido a la calidad de los insumos.

La cartografía de susceptibilidad a deslizamientos consiste en la división de la superficie terrestre en zonas que pueden ser propensas a la ocurrencia de estos procesos debido a la inestabilidad de las laderas (Carrara *et al*., 1995; Delgado *et al*., 2006). Para determinar la susceptibilidad, se delimitan las áreas y las condiciones bajo las cuales pueden ocurrir los procesos de remoción, utilizando variables que se ajustan a las dinámicas y condiciones del lugar (Zeng-wang *et al*., 2001; Huabin, *et al*., 2005). Algunos de los métodos más utilizados son los estadísticos, de factor de certidumbre (CF), procesos analíticos jerárquicos (AHP), índice de entropía (IoE), enfoque difuso (fuzzy), modelos basados en redes neuronales artificiales (ANN), entre otros (Morales, 2018).

La Inteligencia Artificial (IA) es la habilidad de las máquinas para aplicar algoritmos, adquirir conocimientos a partir de datos y utilizarlos para tomar decisiones, como lo haría el ser humano mediante un proceso de razonamiento. La principal diferencia entre los modelos basados en IA y los humanos, es que las máquinas no necesitan descansar y pueden procesar grandes cantidades de información simultáneamente; además presentan una tasa de error significativamente menor en comparación con su contraparte humanas que realiza las mismas tareas (Rouhiainen, 2018).

La aplicación de la IA en las Geociencias concuerda con el avance en las ciencias de la información geográfica (*GIScience*) y el desarrollo de metodologías de manejo, análisis espacial y mapeo. La IA es utilizada como una alternativa a los modelos paramétricos espaciales, su objetivo es buscar mejores resultados en la representación de procesos y patrones geomorfológicos (Moody y Katz, 2004). En su estudio, Moody y Katz (2004) enumeran los enfoques de IA más relevantes en el contexto de la geomorfología y la ciencia de la información geográfica; sobresale el uso de autómatas celulares (cellular automata), sistemas expertos (*expert systems*), algoritmos genéticos (genetic algorithms), conjuntos difusos (*fuzzy sets*) y redes neuronales artificiales (artificial neural *networks*).

Las redes neuronales artificiales (RNA o ANN por las siglas en inglés de Artificial Neural *Network*) conforman un sistema computarizado que imita las funciones cognitivas, compuesto por unidades elementales interconectadas con parámetros libres que pueden ajustarse a partir de patrones de entrenamiento supervisados o no supervisados (Salas, 2004; Voženílek, 2009; Luo *et al*., 2019). La principal ventaja de las RNA radica en su capacidad de adaptarse a situaciones complejas sin hacer suposiciones previas, su inherente no linealidad y su capacidad para manejar datos ruidosos (Noack *et al*., 2014; Peponi *et al*., 2019). Han sido utilizadas en diversas disciplinas como en economía (Artizabal, 2006), agroindustria (Ochoa, 2016), evaluación de patologías

sociales (Palmer y Montaño, 1999) y, por supuesto, en el ámbito geoespacial (Wu *et al*., 2008; Li, 2010; Li *et al*., 2011; Kia *et al*., 2012; Peponi *et al*., 2019).

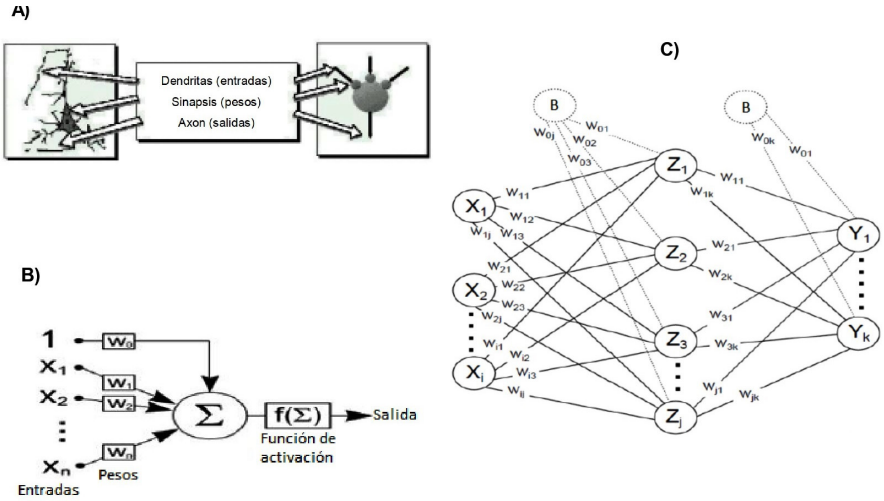
Las redes neuronales artificiales (RNA) son utilizadas en el contexto de los deslizamientos de tierra para establecer relaciones no lineales entre los parámetros geomorfológicos, geológicos y ambientales, enfocados a la probabilidad de ocurrencia (Prabu y Ramakrishnan, 2009; Tsangaratos y Benardos, 2014). En la mayoría de los casos, se complementan con otros métodos para su calibración y se comparan con técnicas estadísticas como probabilísticas que evaluan su eficacia (Can *et al*., 2019). También se han realizado estudios que comparan los resultados de susceptibilidad obtenidos por éstas redes con otros métodos aplicados al estudio de deslizamientos, tales como métodos estadísticos y probabilísticos (Amorim, 2009; Chen *et al*., 2017; Aditian *et al*., 2018; Benchelha *et al*., 2019; Luo *et al*., 2019).

La estructura de una RNA se puede entender al comparar una neurona artificial con una biológica (figura 1a). Una neurona biológica consta de una dendrita que recibe estímulos, un axón que actúa como canal de salida y la sinapsis que es la región conectiva. En las neuronas artificiales, la entrada es equivalente a la dendrita, la salida es el axón y las capas ocultas se ubican en la sinapsis para generar pesos (Matich, 2001; Levitan y Kaczmarek, 2015). Matemáticamente, la neurona se representa como un modelo que simula la forma de operar del cerebro humano, consta de n entradas que crean un vector x=(x1, …xn). Cada entrada se multiplica con un parámetro de peso correspondiente que puede ser positivo o negativo; finalmente, la suma ponderada se procesa en una neurona de activación que produce la salida final (Figura 1b) (Nevtipilova *et al*., 2014; Althuwaynee, 2019).

En términos de su valor, las neuronas se pueden categorizar en binarias o reales (Matich, 2001). Las neuronas binarias sólo pueden tener dos valores posibles, por lo general 0, 1 o -1, 1. Por otro lado, las neuronas reales pueden tomar cualquier valor dentro de un rango específico, regularmente definido entre 0 y 1 o -1 y 1 (Matich, 2001). Este aspecto es importante porque en la metodología desarrollada, las variables nominales como la litología y la cobertura del suelo se convierten en neuronas binarias, mientras que las variables cuantitativas se estandarizan y se convierten en neuronas reales (motivo principal para la aplicación de dos modelos). Existen dos tipos principales de aprendizaje que se pueden categorizar como supervisado y no supervisado, dependiendo del nivel de control del entrenamiento y la presencia o ausencia de un factor externo que ajuste los pesos de las conexiones entre las neuronas (Matich, 2001; Althuwaynee, 2019). Si las conexiones neuronales avanzan en una sola dirección, se le llama red feedforward (autoalimentada), si las interconexiones tienen múltiples direcciones, se le conoce como retroalimentación roja (red feedback) (Barrera, 2016).

Las arquitecturas de los modelos de redes neuronales artificiales son diversas y dependen completamente de la problemática que aborden. En el caso de la aplicación en fenómenos espaciales, uno de los más utilizados es el multi-capa perceptron (*Multi-layer Perceptron*), el cual se trata de una red neuronal artificial de aprendizaje supervisado con conexiones feedforward, que se apoya en el algoritmo de aprendizaje *Back-propagation* es decir, redes de propagación hacia atrás (Matich, 2001; Moody y Katz, 2004; Nevtipilova *et al*., 2014; Beck, 2018). En la fase de propagación hacia adelante, el modelo divide las capas de neuronas que comparten características similares. La capa de entrada se representa como las neuronas X, la capa oculta como las neuronas Z, la capa de salida como las neuronas Y, los pesos se representan como las líneas W y los juicios o Bias como los nodos B (Figura 1c). En la segunda fase del algoritmo, conocida como propagación hacia atrás, se ajustan los pesos de la red mediante el error de la función de cada neurona en cada interacción (Nevtipilova *et al.,* 2014). En este trabajo en particular, se empleó un modelo de multi-capa perceptron con el algoritmo de backpropagation.

Figura 1. Modelos de redes neuronales



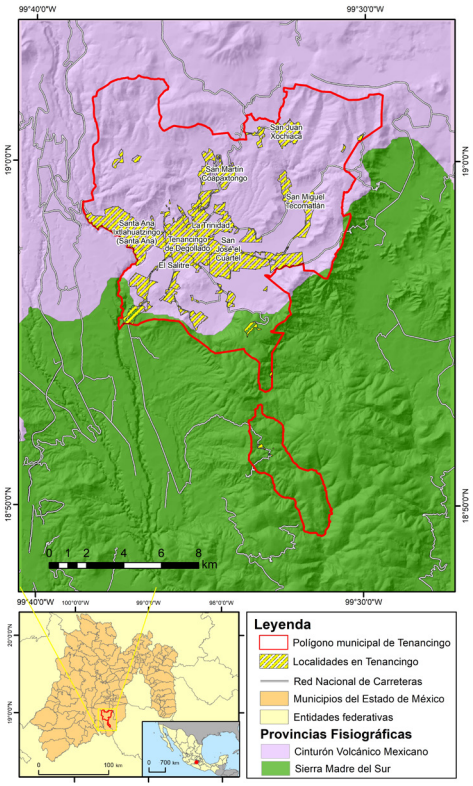
Fuente: modificada de Matich, 2001 y Nevtipilova *et al*., 2014.

2. Área de estudio

El municipio de Tenancingo de Degollado, Estado de México, se delimita por las coordenadas 18° 49′ 10.61″ - 19° 2′ 26.79″ de latitud N y las coordenadas

99° 38′ 25.30″ - 99° 29′ 24.24″ de longitud W. Localizado en la zona de transición entre el Cinturón Volcánico Mexicano y la Sierra Madre del Sur, forma parte de la subprovincia fisiográfica de Lagos y Volcanes de Anahuac al norte y, de la subprovincia de Sierras, Valles Guerrerenses al sur (Figura 2). Para trabajar en una zona continua rectangular que permita el manejo adecuado de las mallas raster, se seleccionaron áreas adyacentes que conforman un polígono con coordenadas limítrofes 18° 47′ 19.42′′ - 19° 4′ 4.42″ de latitud N y 99° 40′ 29.84″ - 99° 27′ 21.26″ de longitud W.

Figura 2. Localización del área de estudio y relación con provincias fisiográficas



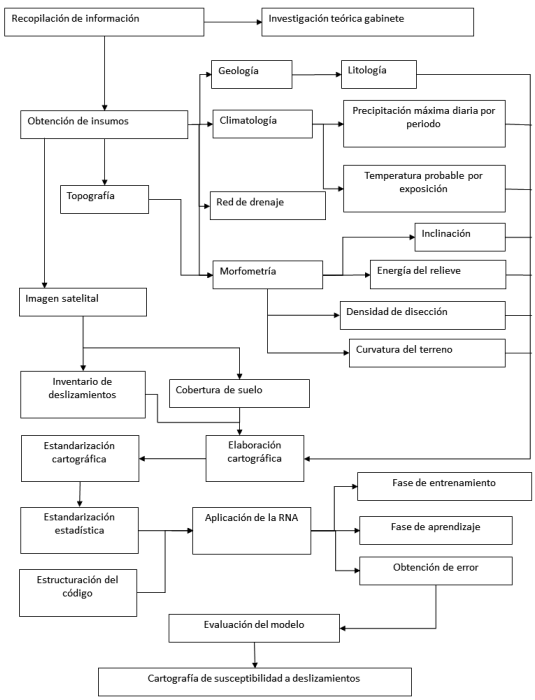
Fuente: elaboración propia con capas del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

3. Metodología

La estrategia para llevar a cabo el análisis de las zonas susceptibles a deslizamientos se puede resumir en una serie de pasos que comprende la in-

vestigación de gabinete hasta la obtención de la cartografía final. Primero, se realiza una búsqueda exhaustiva de información sobre la zona de estudio con el uso de diversas fuentes oficiales y recursos remotos para obtener los datos necesarios. Posteriormente, se elaboran los insumos cartográficos y se estandarizan tanto la cartografía como las estadísticas para garantizar la precisión y confiabilidad de los resultados. Una vez completada esta fase, se procede a estructurar el código y aplicar la Red Neuronal Artificial (RNA) para generar el proceso de entrenamiento y aprendizaje del modelo. Durante este proceso, se realiza un seguimiento constante del error obtenido, lo que permite evaluar y mejorar el modelo de forma continua. Finalmente, se llega a la fase de evaluación del modelo y se obtiene la cartografía final de las zonas susceptibles a deslizamientos (Figura 3).

Figura 3. Diagrama metodológico



Fuente: elaboración propia.

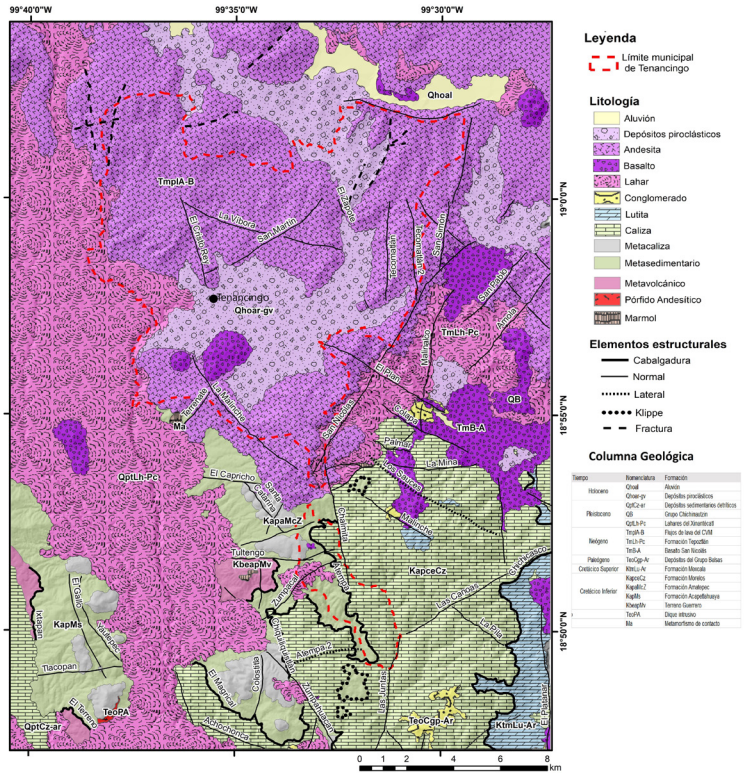
La información acerca de las características litológicas en la zona de estudio se obtuvo a partir de dos cartas geológicas escala 1:50,000: la E14A48 y la E14A58, publicadas por el Servicio Geológico Mexicano (2014) e INEGI (1975)

respectivamente (Figura 4). El área bajo análisis se caracteriza por una compleja sucesión geológica que comprende formaciones sedimentarias del Cretácico, unidades volcánicas del Cenozoico, ubicadas en el período terciario y depósitos volcano-sedimentarios del Cuaternario. Se han identificado dos litologías antiguas, una de metamorfismo de contacto (mármol) y un pórfido andesítico; las cuales se localizan de manera dispersa, definidas en 14 unidades geológicas (SGM, 2014).

Para la cobertura de suelo, se llevó a cabo la clasificación supervisada de una imagen satelital Sentinel 2 (ESA, 2019) corregida atmosférica y geométricamente. Se utilizó el complemento "*Semi-Automatic Classification Plugin*" con 40 polígonos de entrenamiento para cada una de las 7 clases propuestas: urbana-construcción, cultivo, vegetación alta, vegetación de galería, cuerpos de agua, vegetación baja-húmeda y áreas desprovistas de vegetación (figura 5).

Se llevó a cabo un inventario de deslizamientos en la zona de estudio, se utilizó el Atlas de Riesgos Municipal de Tenancingo de Degollado elaborado por la Coordinación General de Protección Civil del Estado de México (2019) y, se reconocieron 13 deslizamientos en la zona urbana del municipio. Tambien, se completó el inventario con la fotointerpretación de la imagen Sentinel 2 (ESA, 2019) con una resolución espacial de 10 metros, obtenida desde la plataforma *Google Earth Engine*. Se identificaron 27 morfologías de deslizamientos adicionales (según la forma de la superficie) composición de las curvas de nivel y un modelo sombreado; en total, un inventario completo de 39 deslizamientos. Además, se descargó la red de drenaje superficial del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas SIATL (INEGI, 2015), la cual fue depurada para corregir posibles errores en su delineado como la corrección de vértices y la compleción de cauces no marcados. Con base en la composición de las curvas de nivel e interpretación de la imagen Sentinel 2; así, el inventario de deslizamientos como la red de drenaje se presentan en la figura 6.

Figura 4. Mapa Geológico

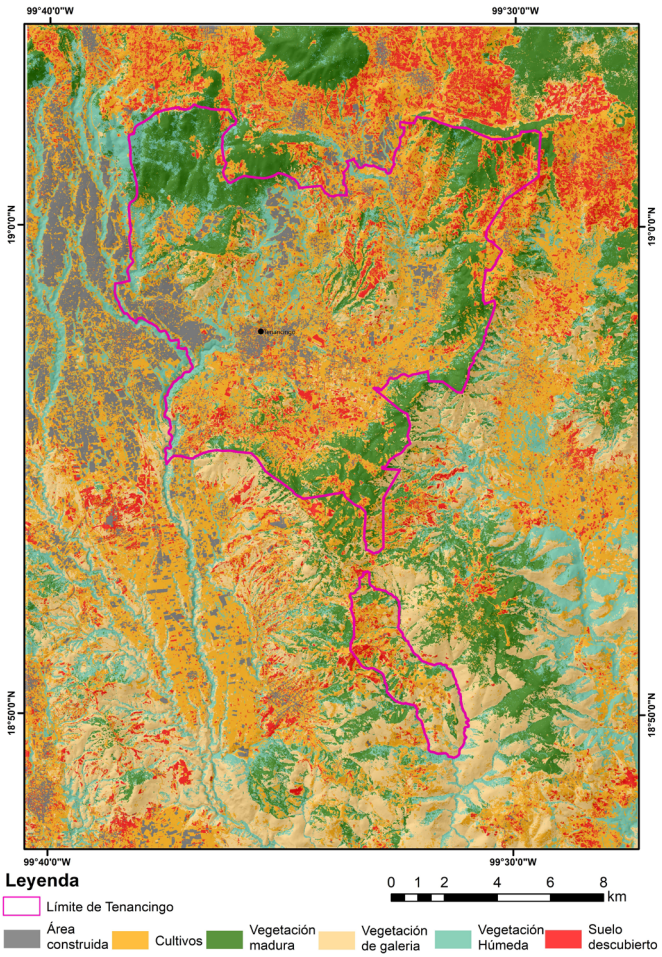


Fuente: elaboración propia con base en INEGI, 1975 y SGM, 2014.

La Geomorfometría se ocupa de la medición cuantitativa del relieve, tanto en términos zonales (geomorfometría general) como de morfologías particulares (geomorfometría específica); el análisis y modelado numérico del terreno (Goudie *et al*., 2003; Minar y Evans, 2008; Pavlopoulus *et al*., 2009). Por ello, prefijo "Geo" se utiliza comúnmente para distinguir esta disciplina de otras ramas científicas que también emplean mediciones topológicas (Evans, 1972). Se elaboró la geomorfometría de la zona de estudio con base en las curvas de nivel 1:50,000 de las cartas topográficas E14A48 y E14A58 de INEGI (2014); interpolada como un Modelo Digital de Elevación (MDE) con una resolución espacial de 20 m, en correspondencia con la equidistancia de las curvas de origen a través de los métodos de Lugo (1988), Olaya (2009) y Quesada y Barrantes (2017). Se generaron mapas de inclinación del terreno (figura 7a), curvatura del terreno (figura 7b), energía del relieve (figura 7c) y densidad de disección (figura 7d); todos procesados en el SIG: QGis 3. Para su clasificación,

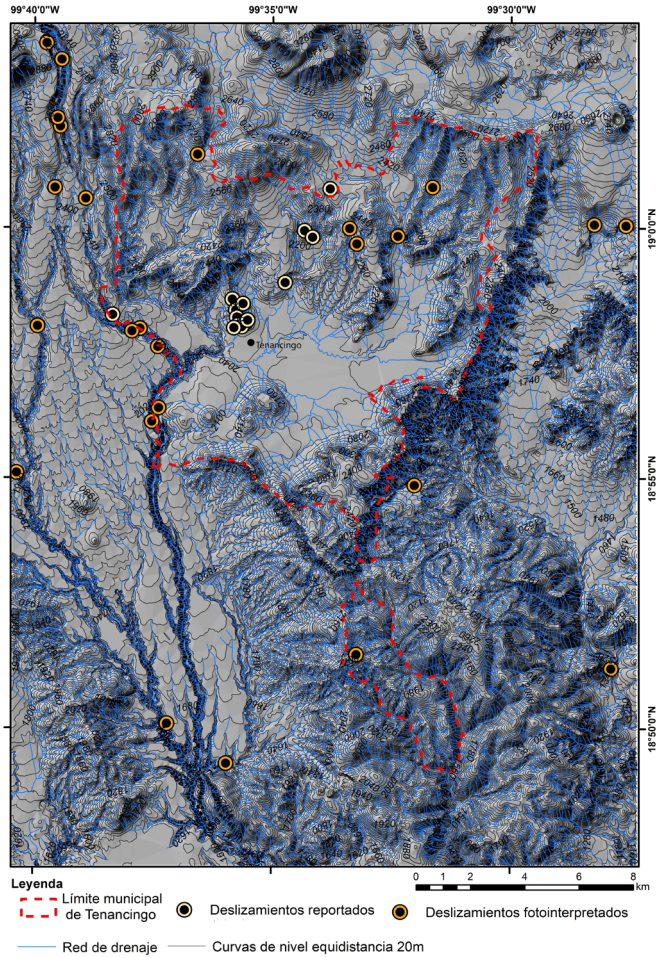
se utilizó el método de *Natural Breaks* (Smith, 2011) con excepción del mapa de curvatura que agrupó dos clases negativas (cóncavas): una clase plana y dos clases positivas (convexas).

Figura 5. Mapa de cobertura de suelo



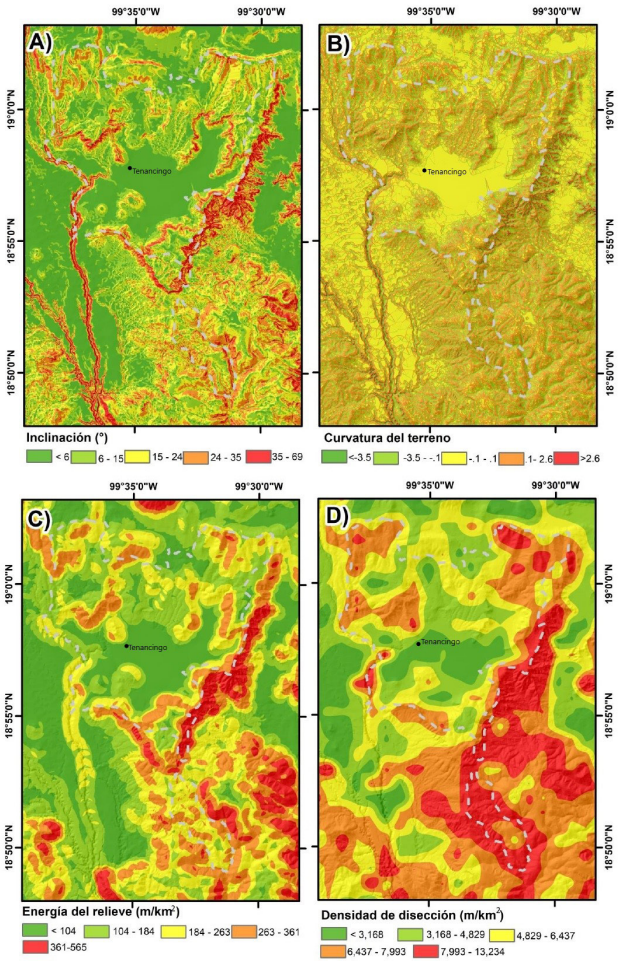
Fuente: elaboración propia con base en la clasificación supervisada de imágen satelital Sentinel 2 (ESA, 2019).

Figura 6. Mapa de inventario de deslizamientos con Red de drenaje



Fuente: elaboración propia.

Figura 7. Variables morfométricas

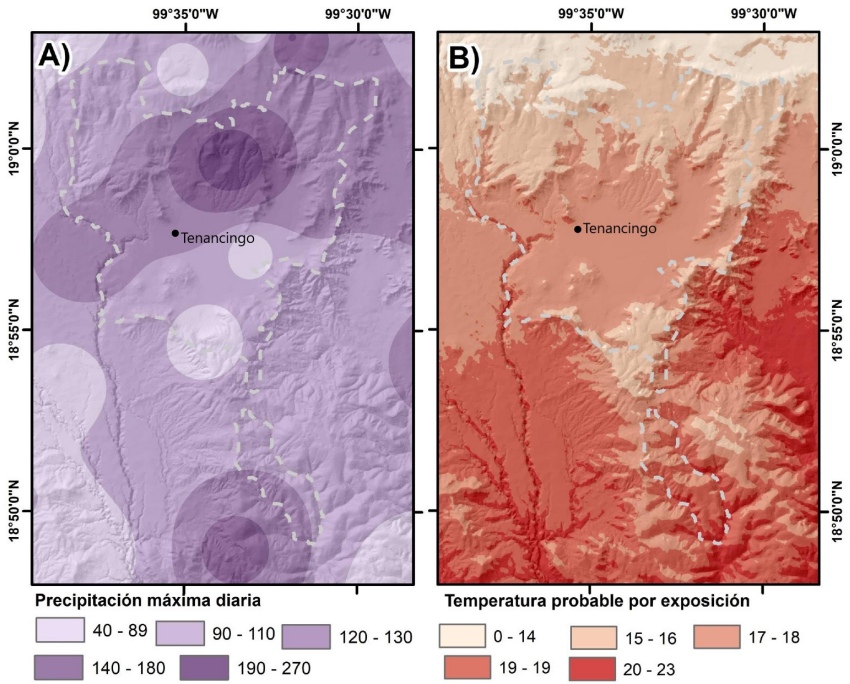


Fuente: elaboración propia.

Para analizar las variables climáticas, se emplearon datos meteorológicos proporcionados por el Servicio Meteorológico Nacional (2015); éstos abarcan un período de 30 años (1983-2013), correspondientes a 36 estaciones meteorológicas ubicadas en la zona de estudio y sus alrededores. Utilizando el programa estadístico Excel, se depuraron los datos del archivo en formato ".csv" y se seleccionó la precipitación máxima diaria de cada estación; estos datos se interpolaron para generar el mapa (Figura 8a). Además, se elaboró un mapa de temperatura probable por exposición que integra la temperatura media

anual, la elevación, inclinación y orientación del terreno como el índice de irradiación. En primer lugar, se realizó una regresión lineal entre la temperatura y la elevación. Posteriormente, se generó un mapa de exposición a partir de la clasificación de los mapas de inclinación y orientación según el índice de irradiación (Zepeda, 2020). Finalmente, se combinaron los dos productos para producir el mapa de temperatura probable por exposición (Figura 8b). Todos los procedimientos fueron realizados con el software *TerrSet* (*Clark Labs*, 2015).

Figura 8. Variables climáticas



Fuente: elaboración propia con datos del Servicio Meteorológico Nacional, 2015.

En la fase de modelado, se hizo una estandarización cartográfica de las variables utilizadas, para lo cual, convirtió todas las variables en formato Ráster ajustando el sistema de sus coordenadas; escalando todas las teselaciones en una resolución espacial de 20 metros por pixel, estableciendo la extensión de la zona. En el caso de las variables nominales, como cobertura de suelo y litología, se reclasificaron los valores para tener un raster discreto.

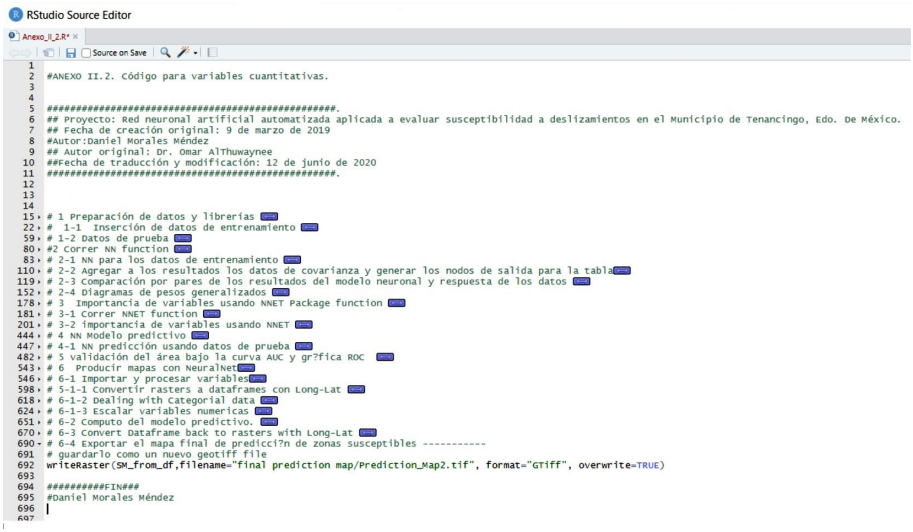
Se procedió a generar los datos necesarios para entrenar y probar el modelo, se consideró el inventario de deslizamientos anteriores como condiciones

de inestabilidad; con el objetivo de definir los puntos de baja susceptibilidad y generar un modelo preciso sin sobreestimaciones, identificando zonas seguras que utilizan las estadísticas de inclinación con relación a los deslizamientos inventariados. Para realizar esta tarea, se utilizó la herramienta "*Point Sampling Tool*" de *QGis* 3. El resultado de la intersección de las estadísticas de inclinación y los deslizamientos anteriores mostró que la pendiente mínima en un deslizamiento es de 6.68°. Por lo tanto, se llevó a cabo un muestreo aleatorio en las zonas con una inclinación menor a este valor. El muestreo se realizó con la misma cantidad de puntos que se encontraban en el inventario de deslizamientos anteriores, lo que resultó un total de 39 puntos.

Este inventario de deslizamientos y los puntos seguros, fueron tomados como valores de entrenamiento para generar datos de prueba del modelo. Se realizó un muestreo aleatorio basado en los valores de inclinación que generaron 50 puntos de prueba, de los cuales, 25 presentaron valores similares a los registrados en el inventario de deslizamientos y los 25 restantes valores de pendiente menores a 6.68°. Posteriormente, se extrajeron los valores de cada variable tanto para los puntos de entrenamiento como los de prueba; utilizando la herramienta "*Point Sampling Tool*". Los cuadros de atributos resultantes fueron exportados para su manejo en la Red Neuronal Artificial (RNA) del entorno *RStudio*.

El ambiente integrado por *RStudio* generó dos modelos de Redes Neuronales Artificiales (RNA) con el lenguaje de programación estadístico R. El código utilizado fue traducido y modificado al trabajo de Althuwaynee (2019) con el objetivo de facilitar la descripción de los elementos más importantes, razón por la cual el código se dividió en varias secciones. También, se elaboró un código que puede ser utilizado con variables numéricas continuas, y otro aplicado a cualquier tipo de variables con la finalidad de evaluar la utilidad de variables categóricas como la cobertura de suelo y geología en modelos matemáticos de inteligencia artificial; además de determinar si los fines del presente ejercicio conviene utilizar variables numéricas con errores evaluables en escalas precisas. Ambos códigos dividen las mismas secciones y se pueden consultar en la figura 9.

Figura 9. Código resumido de la RNA utilizada



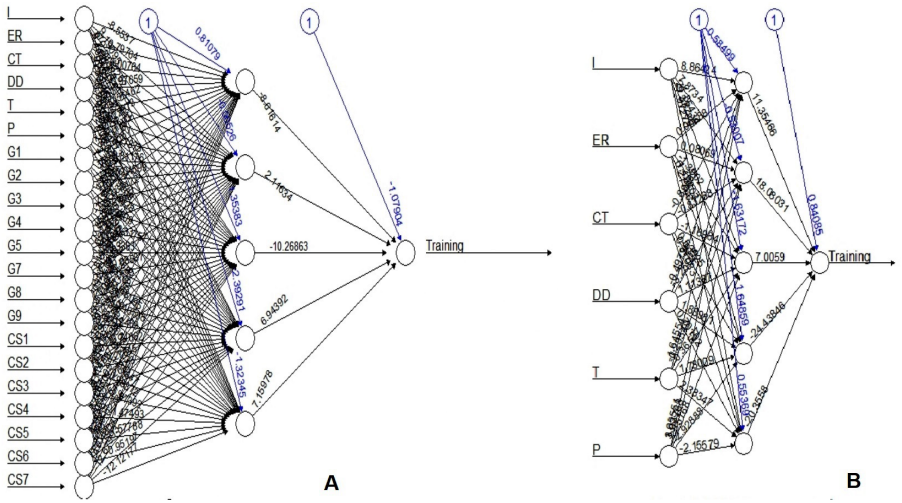
Fuente: elaboración propia.

En términos generales, en el script bajo el entorno de desarrollo integrado (IDE) *RStudio*, se insertan las variables geomorfométricas, climáticas y geológicas al modelo NeuralNet (nn) y al paquete NNET después de haber sido estandarizadas cartográfica y estadísticamente. Las RNA se entrenaron utilizando la función de Entropía Cruzada más gráficos que describían los pasos del modelo. Además, se concluyó la fase de entrenamiento aplicando el algoritmo de *Backpropagation*. Para componer el modelo predictivo de zonas de susceptibilidad, se utilizaron los datos de prueba. Finalmente, se realizó el análisis del área bajo la curva (AUC) que generó este gráfico, característica operativa del receptor (ROC). Por su parte, las dos variables nominales (geología y cobertura de suelo) se reclasificaron con un índice numérico sin ningún orden específico; es importante recordar que, dentro de la función de la red neuronal, las regresiones lineales y sus interaciones en la fase de entrenamiento definen su importancia, tomándolas como una neurona binaria, es decir, si en cada clase se encuentran o no condiciones de deslizamientos pasados o puntos seguros.

4. Resultados

Los resultados iniciales de la red neuronal se presentan en la figura 10, se pueden observar los diagramas del modelo de perceptrón multicapa con 5 capas ocultas y los pasos que se van propagando. Lo más destacable de estos diagramas es el valor del error obtenido para el modelo 1, que incluye todas las variables de 0.033506130; mientras para el modelo 2, las variables son cuantitativas con un error de 0.049959234.

Figura 10. Modelos de red neuronal, del lado izquierdo (A) el modelo 1 (todas las variables) del lado derecho (B) modelo 2 (cuantitativo)



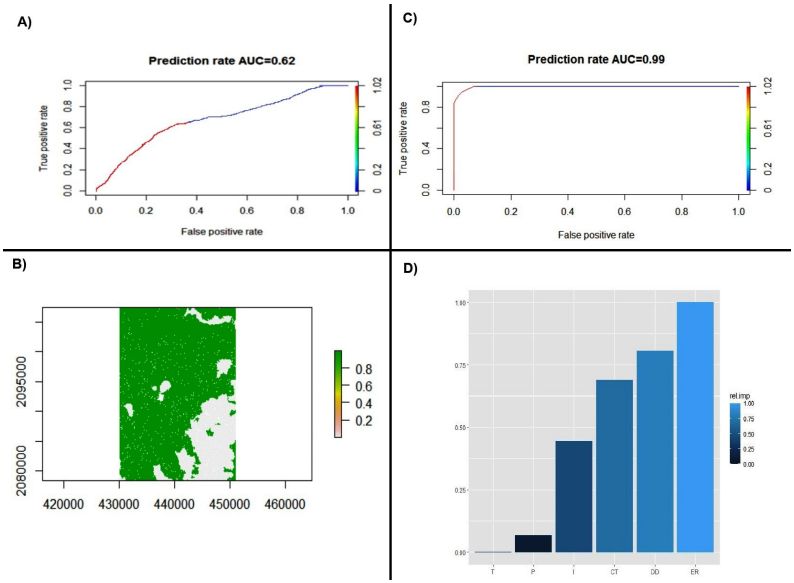
Fuente: elaboración propia.

Se evaluaron los dos modelos mediante la obtención del área bajo la curva (AUC) y la curva de característica operativa del receptor (ROC). El modelo número 1 de ineficiente obtuvo un valor de AUC con 0.62 en comparación al modelo ideal de 1.00 (Figura 11a). Esto podría deberse a la inclusión de neuronas binarias que representan clases nominales, así como la sobreestimación de las áreas en geología de los diagramas anteriores. Las extensas áreas de caliza y lahar, en la mayoría de los datos de entrenamiento y prueba coinciden explicando esta sobreestimación. El mapa de salida generado en *RStudio* también confirmó esta afirmación (Figura 11b); por lo tanto, a partir de este momento nos centraremos en el modelo 2 con la RNA y el mapa de susceptibilidad resultante del presente trabajo. El modelo 2 obtuvo una ratio de AUC

con 0.99, lo que significa ser altamente fiable. Sin embargo, es importante tener en cuenta que se obtiene este resultado debido a que este modelo se limita a variables cuantitativas, lo cual restringe el procedimiento dentro de la red neuronal, sobre todo en la relación de las zonas de entrenamiento y prueba en cuanto a la inclinación del terreno (Figura 11c).

Antes de presentar el mapa final, se muestra el diagrama que ilustra la importancia relativa de las variables para el modelo 2. Se destaca la energía del relieve como factor más importante, mientras que la temperatura es la variable con menor influencia. Esta importancia relativa se refiere al modelo matemático de la RNA pues no puede interpretarse solo como la asociación de condiciones con inestabilidad, ya que también se aplica a zonas seguras (Figura 11d).

Figura 11. A) Curva ROC modelo 1, B) mapa modelo 1, C) curva ROC modelo 2 y D) importancia de variables Modelo 2

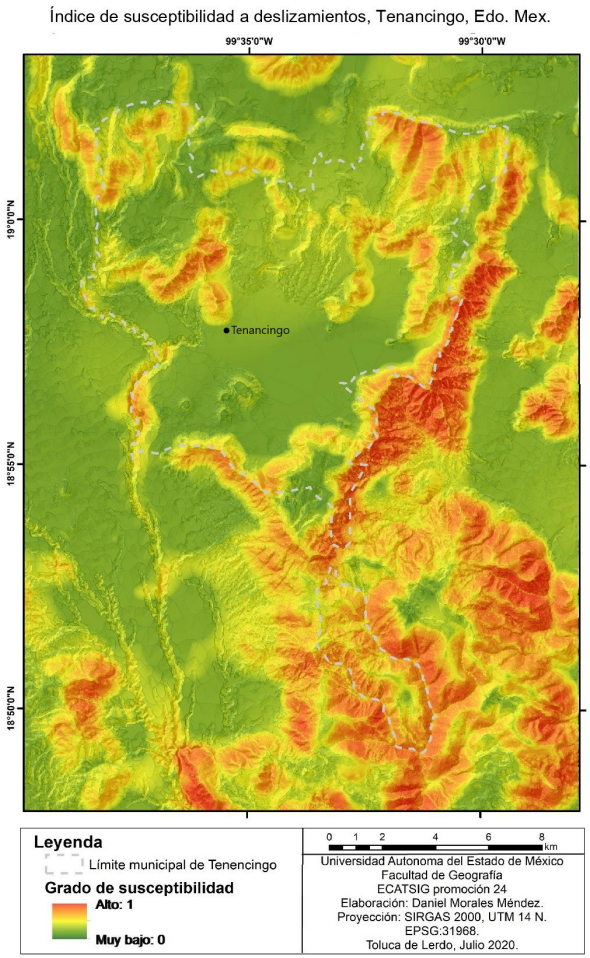


Fuente: elaboración propia.

El mapa índice de susceptibilidad a deslizamientos en el municipio de Tenancingo obtenido mediante el modelo 2 (Figura 12) destaca las áreas más propensas a desarrollar deslizamientos en los escarpes de falla y la región sedimentaria, además de las elevaciones volcánicas y valles profundos. Los valores intermedios se ubican en barrancos y laderas internas de valles que van en transición hacia las zonas sub-horizontales de inundación o laderas

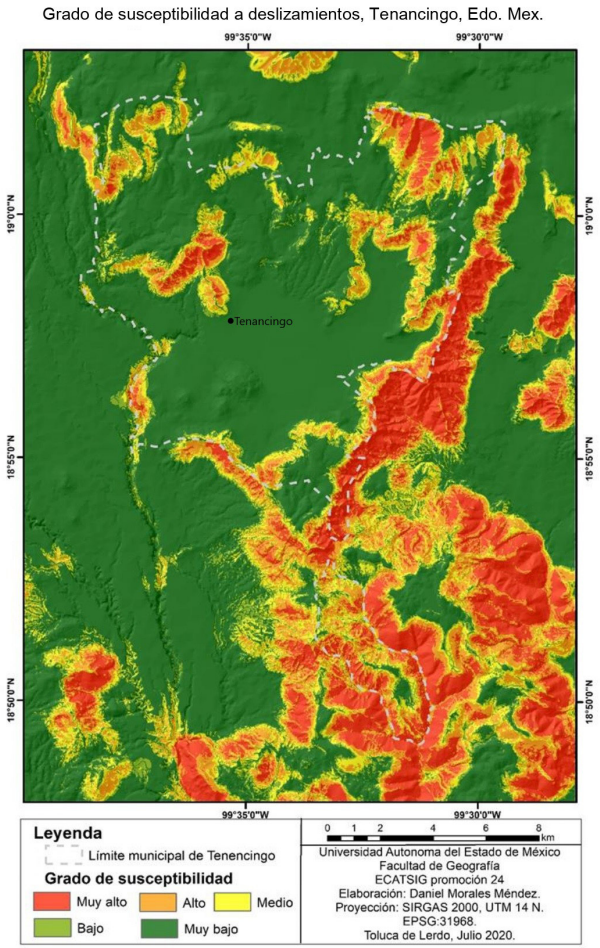
cercanas a las cumbres de los flujos de lava donde los resultados se clasifica en 5 rangos para definir el grado susceptibilidad mediante el método de *Natural Breaks*; los datos indican el 13% del área de estudio corresponde a un grado de susceptibilidad muy alto, el 11% a zonas de grado alto, el 9% a susceptibilidades medias, el 6% a regiones con grado bajo y el 61% a valores muy bajos (Figura 13).

Figura 12. Índice de susceptibilidad a deslizamientos



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Grado de susceptibilidad a deslizamientos



Fuente: elaboración propia.

Según la interpretación visual del índice de susceptibilidad, se puede observar que la pendiente del terreno y las áreas de energía del relieve alta son las variables más influyentes para determinar zonas susceptibles. Algunas zonas con inclinaciones altas, como los valles profundos del suroeste, tienen valores subestimados y toda la región del este coincide con valores altos en las dos variables mencionadas. Se puede ver una clara relación entre las cuatro variables geomorfológicas, mientras que la temperatura y la precipitación muestran mayor influencia en la determinación de zonas con susceptibilidad

bajas y muy bajas; lo mismo como en las superficies sub-horizontales del norte, en contraste con las del sur es que presentan tonalidades de verde distintas. En el mapa de grado de susceptibilidad, destacan los valores extremos que conforman grandes áreas de grado muy bajo y lugares localizados fácilmente con valores muy altos, mientras los demás valores forman franjas de transición muy cortas.

Conclusiones

El mapa de susceptibilidad a deslizamientos generado mediante el uso de una red neuronal artificial con variables cuantitativas ha producido resultados convincentes (diferencia del modelo que incluye variables categóricas). Es importante señalar que factores como la litología, la cobertura de suelo u otras variables cualitativas del sistema terrestre, tienen un papel importante en la evaluación de la susceptibilidad a procesos de remoción en masa. El problema radica en los modelos matemáticos sofisticados que no suelen incluir directamente el tratamiento de variables categóricas, lo que sugiere la interpretación en campo y la aplicación del juicio humano fuera del ámbito de la inteligencia artificial para un análisis profundo.

Como se menciona, la incorporación de modelos de inteligencia artificial en el análisis geomorfológico proporciona un nivel de automatización y proceso de datos superior al de los métodos convencionales, lo que permite obtener dos modelos diferentes con la misma estructura de código. Si bien las fases de entrenamiento y prueba con alrededor de 130 datos resultaron útiles debido a la disponibilidad de los mismos, se requiere aumentar la cantidad de muestras para obtener un espectro más amplio de acción en las regresiones.

Con relación al modelo 1, se puede observar que hubo algunos problemas durante su aplicación, principalmente la sobreestimación de la geología como variable, debido a la mayoría de los eventos registrados en los lahares y las lutitas, mientras que las calizas tienen pocos deslizamientos que evidencian una autocorrelación espacial.

Ambos modelos demostraron que las variables morfométricas, especialmente la energía del relieve e inclinación, tuvieron buen rendimiento; cabe destacar que este modelo pudo identificar las zonas con curvatura cóncava propensas a deslizamientos. Sin embargo, es importante mencionar que al utilizar el MDE obtenido a partir de curvas de nivel con equidistancia de 20 metros como insumo base, están limitados a esta precisión, por lo tanto, el relieve está generalizado a este nivel.

El estudio realizado encuentra que las variables climáticas, a diferencia de las geomorfométricas, no tuvieron un papel predominante en los modelos pues se consideró la precipitación y su temperatura, con una contribución limitada; aun así, sugiere considerar los valores máximos de precipitación y la temperatura no solo como factores de exposición, sino como variables di-

námicas que pueden representar umbrales de activación tal como se ha observado en la realidad.

Aunque el modelo se enfocó en los elementos geomorfométricos y exógenos, es importante considerar la posible activación de deslizamientos producto de eventos sísmicos. En este estudio, no se aborda la sismicidad pues la cantidad de datos de aceleración del terreno disponibles no eran suficientemente representativos por su escala y cantidad. Sin embargo, se debe considerar agregar esta variable en futuros análisis de susceptibilidad conformados por métodos de IA. Aunado a la insuficiencia de datos, para lograr resultados más precisos, se requieren inventarios más detallados y rigurosos. El número de 40 deslizamientos registrados podría ser insuficiente para un análisis exhaustivo a través de una red neuronal artificial. La calidad de los datos de entrada es fundamental para mejorar la eficiencia de cualquier modelo predictivo.

Resalta la ventaja de utilizar una red neuronal artificial por su capacidad para generar automáticamente los pesos de las variables, basándose en su función de aprendizaje que, en este caso, fue la entropía cruzada. Esta característica de la red neuronal proporciona como resultado una matriz y modelo de pesos predictivos, los cuales pueden ser complementados con otras técnicas de ciencia de datos y/o análisis espacial; para obtener así una representación más precisa de las áreas susceptibles a los deslizamientos. Sin embargo, se necesita llevar a cabo una validación en campo que respalde los resultados estadísticos obtenidos y asegurar la aplicabilidad del modelo en relación con las condiciones de inestabilidad. Una opción para lograr esto, es evaluar el factor de seguridad (*safety factor*) en laderas con diferentes niveles de susceptibilidad, lo que permite contrastar los resultados del modelo con la observación directa de la inestabilidad de la ladera.

El estudio actual produjo hallazgos que son debatibles en términos de interpretación, pero sólidos en cuanto a su construcción. Las redes neuronales artificiales son eficaces para analizar el relieve, así como otros enfoques de inteligencia artificial. Resulta importante tener en cuenta el propósito detrás de estos métodos, generar modelos que se aproximen a la representación de la realidad, encaminados a dar alternativas para resolver problemas que afectan a la sociedad en su inseparable relación con el sistema terrestre.

Bibliografía

Aditian, A., Kubota, T., y Shinohara, Y. (2018). "Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia" en *Geomorphology*, 318, 101-111.

Alcántara-Ayala, I. (2004). "Hazard assessment of rainfall-induced landsliding in Mexi-

co" en Geomorphology, 61(1), 19-40.

Althuwaynee, O. (2019). H*ow to easily use ANN for prediction mapping using GIS data?* Udemy. https://www.udemy.com/course/how-to-use-ann-for-prediction-mapping-using-gis-data/

Amorim, S., Corominas Dulcet, J., Lantada Zarzosa, M. D. L. N., Baeza Adell, C., Portilla, M., y Angulo Bahón, C. (2009). "Análisis comparativo de técnicas estadísticas y de aprendizaje para evaluar la susceptibilidad del terreno a los deslizamientos superficiales en el pirineo catalán" en *VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables* (pp. 737-748). Universitat Politècnica de Catalunya. Centre Internacional de Mètodes Numèrics en Enginyeria (CIMNE).

Aristizábal, M. C. 2006. "Evaluación asimétrica de una red neuronal: aplicación al caso de la inflación en Colombia" en *Lecturas de Economía*, (65), 73-116.

Barrera, J. A. T. 2016. Redes Neuronales. Universidad de Guadalajara. http://www.cucei.udg.mx/sites/default/files/pdf/toral_barrera_jamieareli.pdf

Beck, M. W. (2018). NeuralNetTools: Visualization and analysis tools for neural networks. *Journal of statistical software, 85*(11), 1.

Benchelha, S., Aoudjehane, H. C., Hakdaoui, M., El Hamdouni, R., Mansouri, H., Benchelha, T., Alaoui, M. (2019). "Landslide Susceptibility Mapping in the Municipality of Oudka, Northern Morocco: a Comparison Between Logistic Regression and Artificial Neural Networks Models" en International Archives of the Photogrammetry, *Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 42*(4/W12).

Bishop, M. P., James, L. A., Shroder Jr, J. F., y Walsh, S. J. (2012). "Geospatial technologies and digital geomorphological mapping: concepts, issues and research" en *Geomorphology, 137*(1), 5-26.

Borja, R.C., Alcántara-Ayala, I. (2010). "Susceptibilidad a procesos de remoción en masa en el municipio de Tlatlauquitepec, Sierra Norte de Puebla" en *Investigaciones geográficas*, (73), 7-21.

Can, A., Dagdelenler, G., Ercanoglu, M., y Sonmez, H. (2019). "Landslide susceptibility mapping at Ovacık-Karabük (Turkey) using different artificial neural network models: comparison of training algorithms" en *Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 78*(1), 89-102.

Capra, L., Lugo Hubp, J., Borselli, L. (2003). "Mass movements in tropical volcanic terrains: the case of Teziutlán (México)" en *Engineering Geology, 69*(3), 359-379.

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., Reichenbach, P. (1995). "GIS technology in mapping landslide hazard" en Carrara, A., Guzzetti, F. (Eds.): *Geographical information systems in assessing natural hazards*. Springer Netherlands. 354 pp.

Chaparro, J. C. M. (2020). Identifying and Mapping the Risk of Rockfall and Landslide on Roads and Urban Areas. In *Mapping the Risk of Flood, Mass Movement and Local Subsidence* (pp. 23-39). Springer, Cham.

Chen, W., Pourghasemi, H. R., Kornejady, A., y Zhang, N. (2017). "Landslide spatial

modeling: introducing new ensembles of ANN, MaxEnt, and SVM machine learning techniques" en *Geoderma*, 305, 314-327.

Clarck Labs (2015). Software TerrSet.

Coordinación General de Protección Civil del Estado de México (2019). *Atlas Municipal de Riesgos de Tenancingo*. Gaceta municipal, Gobierno del Estado de México. 377 pp.

Delgado, J., Peláez, J.A., Tomás, R., Estévez, A., López Casado, C., Doménech, C. (2006). "Evaluación de la susceptibilidad de las laderas a sufrir inestabilidades inducidas por terremotos. Aplicación a la cuenca de drenaje del río Serpis (provincia de Alicante)" en *Revista de la Sociedad Geológica de España, 19*(3-4), 197-218.

Díaz, S. R., Cadena, E., Adame, S., y Dávila, N. (2020). "Landslides in Mexico: their occurrence and social impact since 1935" en *Landslides, 17*(2), 379-394.

Dikau, R. (1996). *Landslide recognition: identification, movement, and causes*. International Association of Geomorphologists (No. 1), 274 pp.

European Space Agency (ESA) (2019). *Imagen Sentinel 2*.

Evans, I.S. (1972). "General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics" En: Chorley, R.J. (Ed.), *Spatial Analysis in Geomorphology*. Harper y Row, pp. 17–90.

Goudie, A., Anderson, M., Burt, T., Lewin, J., Richards, K., Whalley, B., Worsley, P. (2003). *Geomorphological Techniques*. Routledge: UK. 570 pp.

Huabin, W., Gangjun, L., Weiya, X., Gonghui, W., 2005. "GIS-based landslide hazard assessment: an overview" en Progress in *Physical Geography, 29*(4), 548-567.

Huggett, R. (2007). *Fundamentals of geomorphology*. Routledge, 458 pp.

Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. (2013). "The Varnes classification of landslide types, an update" en *Landslides 11*, 167-194.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (1975). *Carta Geológica*. E14A48, escala 1:50,000.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2014). *Cartas topográficas*. E14A48 y E14A58, escala 1:50,000.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) (2015). *Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas*. SIATL.

Jaimes, M.A., Niño, M., Reinoso, E. (2013). "Una aproximación para la obtención de mapas de desplazamiento traslacional de laderas a nivel regional inducido por sismos" en *Ingeniería sísmica*, (89), 01-24.

Kia, M. B., Pirasteh, S., Pradhan, B., Mahmud, A. R., Sulaiman, W. N. A., y Moradi, A. (2012). "An artificial neural network model for flood simulation using GIS: Johor River Basin, Malaysia" en *Environmental Earth Sciences, 67*(1), 251-264.

Levitan, I. B., y Kaczmarek, L. K. (2015). *The neuron: cell and molecular biology*. Oxford University Press.

Li, D. (2010). "Remotely sensed images and GIS data fusion for automatic change detection" en *International Journal of Image and Data Fusion, 1*(1), 99-108.

Li, Y., Li, C. K., Tao, J. J., y Wang, L. D. (2011). "Study on Spatial Distribution of Soil Heavy Metals in Huizhou City Based on BP--ANN Modeling and GIS" en *Procedia Environmental Sciences,* 10, 1953-1960.

Lugo Hubp J., (1988). *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos cartográficos)*. Instituto de Geografía, UNAM. 128 pp.

Luo X, Lin F, Zhu S, Yu M, Zhang Z, Meng L, *et al.* (2019). Mine landslide susceptibility assessment using IVM, ANN and SVM models considering the contribution of affecting factors. *PLoS ONE 14*(4): e0215134. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0215134

Matich, D. J. (2001). *Redes Neuronales: Conceptos básicos y aplicaciones*. Universidad Tecnológica Nacional.

Minár, J. y Evans, I. S. (2008). "Elementary forms for land surface segmentation: The theoretical basis of terrain analysis and geomorphological mapping" en *Geomorphology, 95*(3), 236-259.

Moody, A., y Katz, D. B. (2004). *Artificial intelligence in the study of mountain landscapes* (pp. 220-251). Springer-Praxis Publishing: Chichester.

Morales D. (2018). *Evaluación del método multi-criterio para la zonificación de deslizamientos: Huehuetla, Puebla y Metztitlán, Hidalgo. México*. Tesis de Licenciatura en Geografía, FFyL, UNAM. 158 pp.

Nevtipilova, V., Pastwa, J., Boori, M. S., y Vozenilek, V. (2014). "Testing artificial neural network (ANN) for spatial interpolation" en *J Geol Geosci, 3*(145), 2.

Noack, S.; Knobloch, A.; Etzold, S.H.; Barth, A.; Kallmeier, E. (2014). "Spatial predictive mapping using artificial neural networks" en *Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-2, 2014 ISPRS Technical Commission II Symposium*, Toronto, ON, Canada, 6–8 October 2014; pp. 79–86. [CrossRef]

Ochoa Martínez, C. I. (2016). "Red neuronal artificial en respuesta a predicciones de parámetros de transferencia de masa (pérdida de humedad y ganancia de sólidos) durante la deshidratación osmótica de frutas" en *Acta Agronómica, 65*(4).

Olaya, V. (2009). "Basic land-surface parameters" En: Hengl, T., Reuter, H.I. (Eds.), *Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Elsevier, Amsterdam, 765 pp.

-Otto, J. C., Prasicek, G., Blöthe, J., y Schrott, L. (2017). *GIS Applications in Geomorphology.*

Palmer Pol, A., y Montaño Moreno, J. J. (1999). "¿Qué son las redes neuronales artificiales? Aplicaciones realizadas en el ámbito de las adiciones" en *Adicciones,*

11(3).

Pavlopoulos, K., Evelpidou, N., Vassilopoulos, A. (2009). M*apping geomorphological environments. Berlin*. Springer Science y Business Media. 235 pp.

Pedraza, G. J. (1996). *Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones*. Ed. Rueda, 414 pp.

Peponi, A., Morgado, P., y Trindade, J. (2019). "Combining Artificial Neural Networks and GIS Fundamentals for Coastal Erosion Prediction Modeling" en *Sustainability, 11*(4), 975.

Piña, V. M. G., Paulín, G. L., y Quesada, J. F. A. (2019). "Evaluación de la susceptibilidad de deslizamientos en el río El Estado, Puebla-Veracruz, México" en *Revista Geográfica,* (160), 129-147.

Prabu, S., Ramakrishnan, S.S. (2009). "Combined use of socio economic analysis, remote sensing and GIS data for landslide hazard mapping using ANN" en *Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 37*(3), 409-421.

Quesada Román, A., Barrantes Castillo, G. (2017). "Modelo morfométrico para determinar áreas susceptibles a procesos de ladera" en *Investigaciones Geográficas* (94), 1-12. doi:http://dx.doi.org/10.14350/rig.57318.

Ramos-Bernal, R. N., Vázquez-Jiménez, R., Tizapa, S. S., y Matus, R. A. (2019). "Characterization of Susceptible Landslide Zones by an Accumulated Index" en *Landslides*. IntechOpen.

Remondo, J., y Oguchi, T. (2009). *GIS and SDA applications in geomorphology*.

Rouhiainen, Lasse (2018). *Inteligencia artificial*. Alienta Editorial.

Salas, R. (2004). *Redes neuronales artificiales*. Universidad de Valparaıso. Departamento de Computación.

Salinas-Jasso, J. A., Montalvo-Arrieta, J. C., y Reinoso-Angulo, E. (2018). "Landslides induced by a low magnitude seismic sequence at continental interiors: a case study of the Santa Rosa Canyon, northeastern Mexico" en *Landslides, 15*(4), 783-795.

Sánchez-Núñez, J.M., Macías, J.L., Zamorano-Orozco, J.J., Saucedo, R., Torres, J.R., Novelo, D. (2012). "Mass movement processes at the Motozintla Basin, Chiapas, Southern Mexico" en *Geofísica internacional, 51*(2), 169-186.

Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2014). *Carta geológico-minera Tenancingo* E14-A58 escala 1:50,000.

Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (2015). *Datos diarios de Precipitación y temperatura*. Solicitados a las oficinas de SMN.

Tsangaratos, P., Benardos, A. (2014). "Estimating landslide susceptibility through an artificial neural network classifier" en *Natural hazards, 74*(3), 1489-1516.

Valdez, J. E. V., Hernández, A. O., Rodríguez, L. M. E., y Suárez, J. E. B. (2022). Susceptibilidad a deslizamientos en Malinalco, Estado de México, México. Un aporte

a la reducción de riesgos de desastres a escala municipal. *Investigaciones geográficas*, (109), 8.

Voženílek, V. (2009). "Artificial intelligence and GIS: mutual meeting and passing" en *2009 International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems* (pp. 279-284). IEEE.

Wu, Q., Xu, H., y Pang, W. (2008). "GIS and ANN coupling model: an innovative approach to evaluate vulnerability of karst water inrush in coalmines of north China" en *Environmental Geology, 54*(5), 937-943.

Zepeda, M, F., (2020). Seminario de innovaciones geotecnológicas. [Curso presencial]. *Especialidad en Cartografía Automatizada, Teledetección y Sistemas de información Geográfica*. Universidad Autónoma del Estado de México. Toluca, 2020.

Zeng-Wang, X. U. (2001). "GIS and ANN model for landslide susceptibility mapping" en *Journal of Geographical Sciences, 11*(3), 374-381.

Capítulo 2. Geomorfología costera: metodología para un caso de estudio

Luis Miguel Espinosa Rodríguez [1]
José de Jesús Fuentes Junco [2]
Alexis Ordaz Hernández [3]

Introducción

Sin lugar a duda, los sistemas costeros representan altos niveles de complejidad debido a la interacción de ambientes que poseen génesis diferentes, así como procesos evolutivos y dinámicos particulares y disímiles.

Ambientes terrígenos y marinos se encuentran en una lucha constante qué busca el desarrollo de condiciones de estabilidad entre ambos, la cual provoca que los mismos elementos como el sustrato geológico, la acumulación de arena, las salientes rocosas, así como los diferentes tipos de oleaje, corrientes y mareas generen paisajes particulares difícilmente repetibles en el territorio.

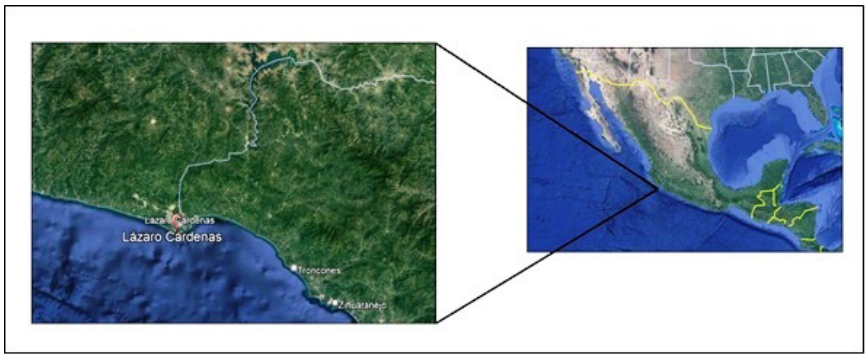
Uno de los ejemplos más interesantes en la búsqueda de homeostasis que configura la línea de costa en el territorio mexicano se encuentra en la región que desemboca la cuenca del río Balsas en el Pacífico con el límite en las entidades estatales de Guerrero y Michoacán (17°55´31´´ de Latitud norte y 102°09´57´´ de Longitud oeste) (Figura 1).

1 Doctor en Geografía. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

2 Doctor en Geografía. Escuela Nacional de Educación Superior, ENES-Morelia. Universidad Nacional Autónoma de México.

3 Doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

Figura 1. Localización de la zona de estudio



Fuente: Google Earth, 2022.

De manera natural la zona de contacto entre el sistema continental y marino ha conformado un delta con tres brazos perfectamente diferenciados y conocidos como las bocas de Burras, La Necesidad y San Francisco.

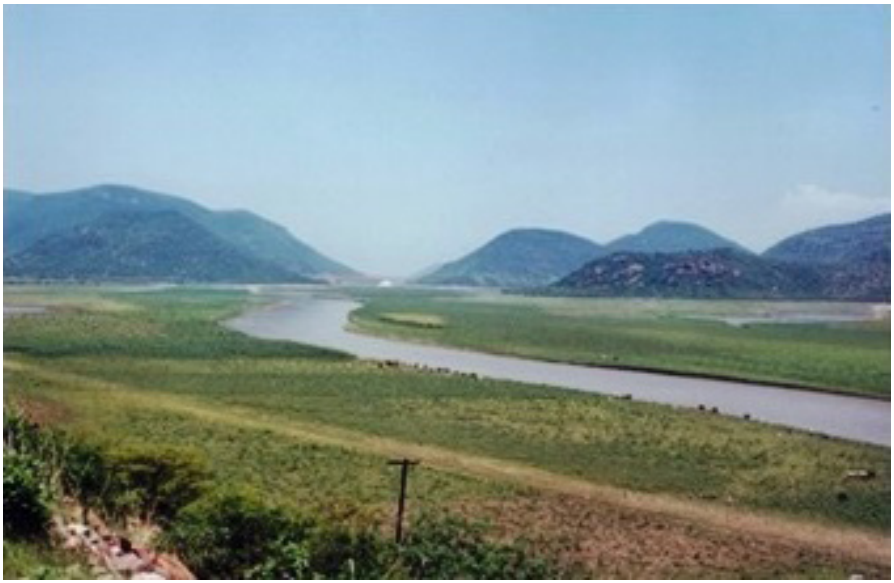
Este sistema costero se había caracterizado por tener una tendencia progradante definida por el dominio fluvial y la carga de sedimentos en una de las cuencas hidrográficas más grande del país, En 1947 comenzaron las obras de ingeniería para construir dos presas hidroeléctricas, la de "Infiernillo" y José María Morelos "La Villita".

El embalse de la presa de Infiernillo se encuentra situado a 500 km de la costa río arriba, ocupa una superficie de 364 km^2; toda vez que el "nivel de aguas máximas extraordinarias" se encuentran a 173 metros sobre el nivel medio del mar, con una capacidad aproximada de poco más de 9,300 hectómetros cúbicos (CFE, 2011) (Figura 2).

Por su parte, la presa José María Morelos "La Villita" se encuentra próxima a la línea de costa (20 km de la desembocadura) posee una capacidad de almacenamiento inferior a su antecesora, calculando 540 hm^3. El "nivel de aguas máximas extraordinarias" se localiza a 60 metros snm (CFE, 2011).

Con las primeras obras de desvío del cauce se presentaron modificaciones en el sistema de transporte y depósito de sedimentos en la costa, así un total del volumen de sedimentos depositados anualmente; condición que propició un aumento relativo en la energía de los procesos marinos sobre la línea de costa y, con ello, el retroceso de esta línea marginal y la pérdida de más de 4 km^2 de superficie frente al mar. Además de otras implicaciones de carácter morfológico en los brazos del delta por corrección de cauces (naturales: por la falta de carga de sedimentos y antrópica: por desvíos y cierre total de las bocas de Burras y La Necesidad).

Figura 2. Fotografía del embalse "Infiernillo" durante el estiaje de 2000. La llanura de inundación del río se observa cubierta de vegetación

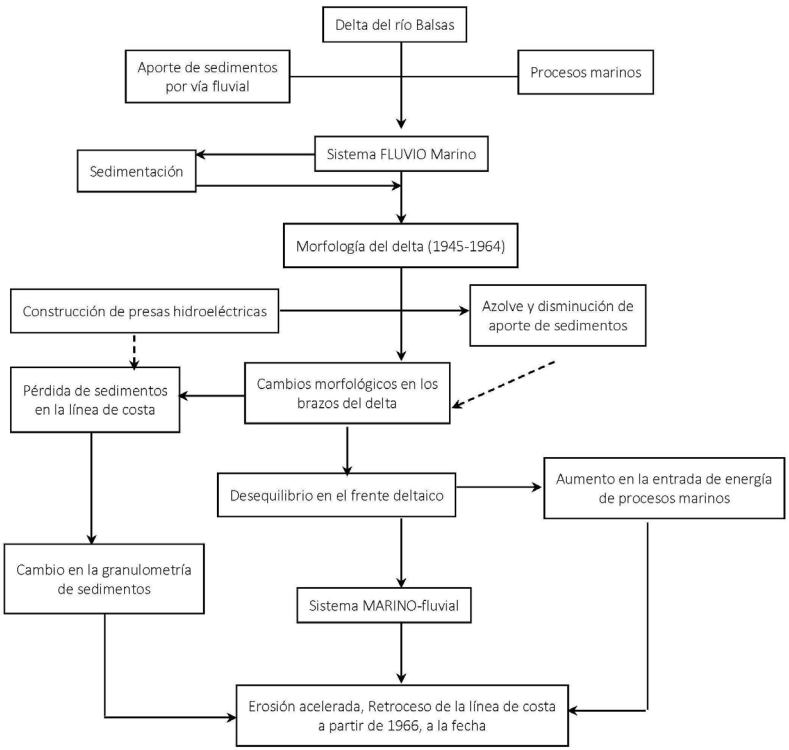


Fuente: fotografía del autor.

Los cambios morfológicos de la costa en cuestión han provocado otro tipo de modificaciones de alto impacto como la modificación granulométrica de los sedimentos en las playas, la pérdida de comunidades vegetales (manglares), la invasión de ambientes y, desde la perspectiva económica, pérdidas de la infraestructura portuaria, industrial y de comunicaciones del sitio.

En la Figura 3 se presenta un esbozo general del proceso histórico de modificación de la zona de estudio.

Figura 3. Esquema general del proceso evolutivo de la desembocadura del río Balsas que comprende de 1947 a 2022



Fuente: elaboración propia.

1. Zona de estudio

Durante el mandato del Presidente Lázaro Cárdenas del Río, 1934 a 1940, se buscó industrializar al país y, con ello, proyectar distintas etapas de construcción en infraestructura, adaptación y equipamiento.

Entre los proyectos más ambiciosos del período presidencial se encontró la creación de un puerto industrial en la costa del Pacífico, el cual fue localizado en el recién conformado municipio de "Melchor Ocampo del Balsas" (1947, antes denominado como Tenencia "Los Llanitos" municipio de Arteaga) ubicado en la derecha del brazo occidental del río.

Veintitrés años después, durante 1970, el nombre del municipio fue reemplazado por "Lázaro Cárdenas" mismo que lleva el puerto industrial.

De acuerdo con la Secretaría de Programación y Presupuesto (1980) durante 1973 la Secretaría de Marina construyó las escolleras de protección y entrada al puerto industrial, se realizó el dragado de la dársena y se realizaron diferentes obras como el muelle de la siderúrgica, el muelle municipal, el faro, las obras de señalamiento y el espigón de Burras entre otras.

Con el Programa Nacional de Puertos Industriales se construyen los bordos de las islas Cayacal y de Enmedio, se dragó la dársena y canales industriales (SPP, 1980), depositaron los sedimentos de dragado en las planicies y cauces abandonados del río, eliminando una parte la cobertura forestal (manglar) y rellenando superficies para emplazar las naves industriales.

Así, en 1979 se construyeron diferentes obras, se terminó la infraestructura y equiparon diferentes industrias, destacándose:

- Construcción del muelle de carga general.
- Construcción del muelle de Fertimex.
- Construcción del sistema de espigones para protección de la línea de costa.

Instalación de las industrias y empresas:

- NKS (National Kwikmetal Service).
- Productora Mexicana de Tubería (PMT).
- Fertilizantes Mexicanos (Fertimex; hoy Fertinal).
- Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- Petróleos Mexicanos (Pemex).
- Siderúrgica Lázaro Cárdenas Las Truchas S.A.(Sicartsa) en la segunda etapa.

Con una temperatura media anual 26.9° C (los meses más calurosos junio, julio agosto y septiembre con registro de temperaturas extremos entre 36° y 39° Celsius), una precipitación media anual de 1,245.8 mm y humedad relativa superior 70% (García, 1983); la nueva ciudad y puerto industrial se abrió paso con más problemas y retos de orden social, económico, ambiental; como la población flotante, los insumos del Gobierno Federal para el funcionamiento urbano, los sismos y tsunamis de 1985, el retroceso de la línea de costa, entre otros.

Finalmente, el crecimiento de la población (Cuadro 1) y la expansión urbana han surgido a la par con el proyecto original de la ciudad industrial, generando un territorio industrial y comercial que, si bien no logró los objetivos del presidente Cárdenas, con el tiempo se constituye como la región más importante en términos económicos.

Cuadro 1. Crecimiento poblacional en el municipio industrial. Aspectos socio demográficos

Año	Población total
1970	24,319
1980	64,355
1988	132,404
2000	170,818
2010	178,817
2020	196,003

Fuente: INEGI, 2022

2. Objetivos

El objetivo de este capítulo se centra en exponer los métodos y materiales que se han empleado para el estudio de la geomorfología costera con el propósito de explicar los criterios empleados en los diferentes períodos de tiempo que se han trabajado en el sector costero.

La base del trabajo centra su estudio en variables de fase documental, trabajo de campo y análisis granulométrico de sedimentos.

La fase documental refiere el estudio teórico de las variables relacionadas con los procesos de modelado costero como el oleaje (periódico, de tormenta y significativo), las corrientes marinas (de deriva litoral y de retorno) y el régimen de mareas; así como los documentos que refieren información de sitio (planos de oleaje, fotografías aéreas, bitácoras del comportamiento local y regional de la marea).

Para el trabajo de campo se describen los procedimientos para elaboración de cartografía geomorfológica a detalle, levantamiento de perfiles de playa, medición de las corrientes de deriva y rip; así como la selección del sitio y tomas de muestras para el análisis granulométrico.

La última parte se concentra en el análisis granulométrico de sedimentos donde se esclarecen los criterios de selección, muestreo, procesamiento, análisis estadístico y gráfico de resultados.

3. Antecedentes

Los estudios de cambios y modificaciones en el sector costero referido data de la década de los años 60, lo que implica un poco más de 50 años de estudios continuos, destacando los siguientes (Cuadro 2).

Cuadro 2. Antecedentes generales de la zona de estudio. Estudios antecedentes realizados en la costa que comprende al sector noroccidental del delta del río Balsas

Año	Autor	Aporte
1970	Reimintz y Gutierrez	Demuestra el cambio sedimentológico rápido ocurrido en el cañón submarino en el delta del río Balsas.
1971	Gutiérrez	Presenta un proceso de clasificación y de distribución espacial de sedimentos a lo largo de la franja costera en donde además de representar características estructurales exhiben que las playas en estudio presentan arenas de tamaño fino y medio de acuerdo con la clasificación de Krumbein.
1985	Ortiz	En este trabajo se presentan los cambios morfológicos generales que se ha originado en los brazos del sistema fluvial, indicando de manera particular un retroceso de la línea de costa en el período comprendido entre 1948 y 1985.
1989	Galaviz y Gutiérrez	Realizan un estudio de características físicas de sedimentos en el antiguo sector de la playa.
1989	Cervantes y Monroy	Realizan un estudio de los cambios morfológicos del delta submarino y muestreo de carácter sedimentológico
1991	Espinosa y Fuentes	Muestra la evolución geomorfológica delta donde se exhiben cambios en el patrón fluvial y se confirma el proceso de retroceso de la línea de costa; se calcula una pérdida de 3.5 kilómetros cuadrados de superficie continental; asimismo se hace un estudio granulométrico que demuestra un cambio en el patrón textural de los sedimentos, que reportándose el engrosamiento de arenas y el desarrollo de guijarros con bloques de mayor tamaño. Este trabajo confirmó el proceso de retroceso de la línea de costa y desaparición de la mayor parte de los depósitos de arena.
2000	Espinosa	Se verifica en campo la destrucción de obras de protección y se cuantifica una pérdida de medio kilómetro cuadrado de costa con referencia al trabajo anterior.
2016	Hernández *et al.*	Con cartografía digital muestran períodos y tasas de avance-retroceso de la franja litoral y el impacto geomorfológico del mismo.

Fuente: elaboración propia.

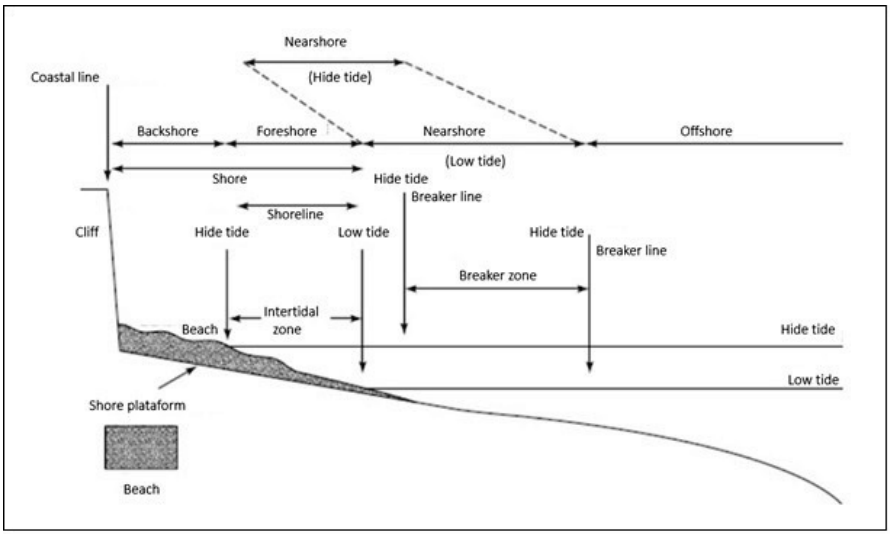
La base teórica de la investigación se basó en los trabajos desarrollados por autores como Wentworth (1922 y 1933), Emery (1938), Krumbein (1934), Inman y Chamberlain (1955), Pettijhon (1963), Allen (1970 y 1985), Selley (1976 y 2000), Reineck y Singh (1980), Fairbridge y Bourgeois (1978), Friedman y Sanders (1978), Ricci-Lucchi (1980), Galloway y Hobbday (1983), Scholle y Spearing (1983), Douglas y McConchie (1994), Arche (1999 y 2010), Nichols (1999), Leeder (1982 y 1999); Reading (1986), Lecuanda (2000), Nichols (2009), Boggs (2012), Leeder (2012), Allen (2017), Sengupta (2017) y Selley (2000); así como algunos trabajos aplicados como los de Anthony y Héquette (2007), Chassagne (*et al.*, 2020), Gijsman (et al., 2020), Aagaard (*et al.*, 2021), Bertolini (*et al.*, 2021), Feist (*et al.*, 2021) y Kasper (*et al.*, 2022).

Se consultaron diferentes trabajos de investigación desarrollados en sistemas costeros disímiles como los de Aarninkhof (*et al*., 2003), Almar (*et al*., 2008), French (2009), Brooks (*et al*., 2016 y 2017), Hurst (*et al*., 2016), Castelle (*et al*., 2017 y 2018), Hansom (*et al*., 2017), Poate (*et al*., 2018), Hossain (*et al*., 2020), Fan (*et al*., 2021), Burvingt (*et al*., 2022), Corbau (*et al*., 2022), D´Alessandro (*et al*., 2022), De Vries (*et al*., 2022), Horton (*et al*., 2022), Isla (*et al*., 2022), Kranenborg (*et al*., 2022), Kronn (*et al*., 2022), Li (*et al*., 2022), Pensantes (*et al*., 2022) y Petropoulos (*et al*., 2022).

4. Desarrollo

Al comienzo de un estudio costero es importante el acopio de información teórica y documental de la zona objetivo, resulta relevante para comprender la dinámica sistémica del sitio; por ello, desde el comienzo de la investigación se hace el manejo de las cartas costeras, aproximación, los mapas portulanos y amarre, el Derrotero Pacífico Mexicano de los sectores Punta Cabeza Negra–Puerto de Lázaro Cárdenas y Puerto de Lázaro Cárdenas – Punta Mangrover de la Secretaría de Marina (2022 en formato digital); así como recurrir a los sistemas de clasificación costera que indican las partes de la misma, zonas de rompimiento del oleaje y la influencia de mareas, entre otros aspectos (Figura 4).

Figura 4. Esquema y terminología empleada para los sectores de playa



Fuente: Bird, 2010.

Asimismo, se realizó la consulta de los cuadros de mareas publicadas por el Instituto de Geofísica de la UNAM (disponible en la página digital del Servicio Mareográfico Nacional). Además del estudio general del sistema, la información del sistema de mareas determinó el criterio de levantamiento cartográfico y sedimentológico; pues todo el trabajo se planeó durante el período de bajamar para encontrar la mayor parte expuesta de la costa.

Una vez con la información recabada, las fases más importantes que se han llevado a cabo para el estudio de la zona costera fueron:

1. Análisis multitemporal de fotografías aéreas y de imágenes de satélite.

Para esta fase se han utilizado fotografías aéreas de 1947 cedidas por la Armada de Estados Unidos, pares fotográficos editados por la compañía Aerofoto de 1979 y 1985, así como materiales editados por INEGI del 2000 e imágenes de satélite de Google Earth de 2010, 2015 y 2020 y Sentinel de 2020.

Los materiales fotográficos fueron procesados con *sterosketch* para lograr la restitución fotogramétrica y eliminar errores, toda vez que la transferencia de información se logró con un transferómetro (Figura 5).

Figura 5. Fotografía aérea de la desembocadura del Balsas durante el año 1947 (izquierda), y misma zona en 2022



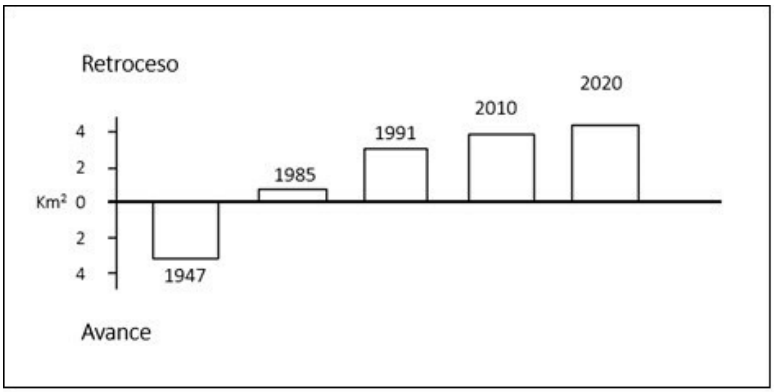
Fuente: Fuerza Naval de Estados Unidos de América (1947) y Google Earth (2022).

A través de la restitución fotogramétrica se compararon las líneas de costa de los años 1947, 1979, 1985, 2000, 2010 y 2020 obteniendo su capacidad para dibujar los cambios morfológicos de los cauces y la línea de costa; consiguiendo el cálculo de tasas de progresión y regresión de la línea de costa.

Este procedimiento se realizó con base en la referencia del año 1979 (se realizaron las primeras obras de protección de playa); de esta manera, se calcularon las superficies de ganancia y/o pérdida de superficie en los pares

fotográficos referidos, estableciendo las tasas de crecimiento y retroceso de la línea de costa (Figura 6).

Figura 6. Tasas de avance (1947) y retroceso de la línea costa referidos en kilómetros cuadrados



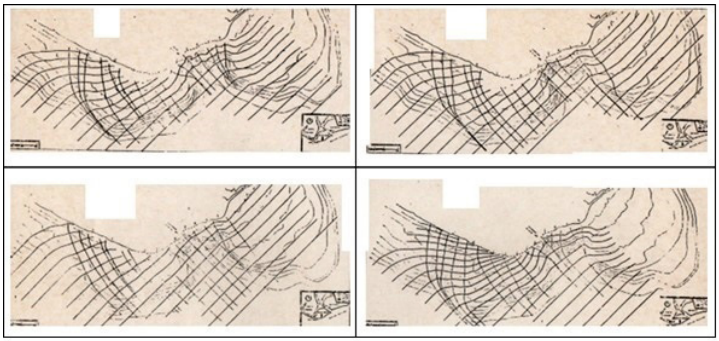
Fuente: elaboración propia.

2. *Análisis del oleaje periódico*

Para el estudio del sistema de oleaje local, se realizó el estudio del patrón de oleaje con planos de diferentes direcciones (N, NW, W, SW y S) con los períodos de tiempo de 7, 9, 11 y 14 segundos.

La importancia de este trabajo radica en determinar características de las crestas como la zona de ataque del frente de oleaje debido a la transformación de trayectorias ortogonales provocadas por la batimetría (Figura 7).

Figura 7. Planos de oleaje de dirección SE, con períodos de 7 y 9 segundos (parte superior), 11 y 14 segundos (parte inferior)



Fuente CIFSA, 1984.

La energía de rompimiento se calcula a través de la ecuación:

$$E = \frac{1}{8} Pg H^2$$ Ecuación 1

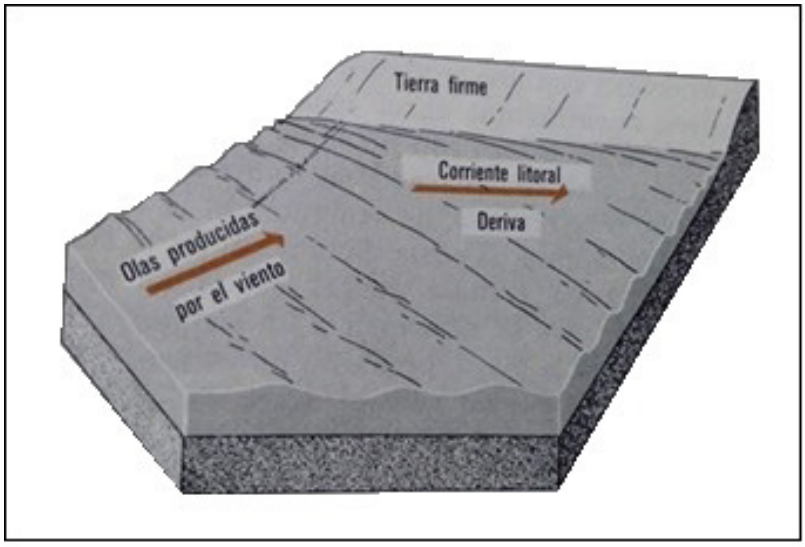
Donde E representa la energía de rompimiento, Hb la altura de rompimiento, P la densidad el agua y g la aceleración de la gravedad.

Se realizó la diferencia estacional de altura (verano e invierno) y se revisó la información del oleaje significativo como de tormenta; también, se define la forma de rompimiento del mismo (voluta).

3. Análisis de la corriente de deriva

La determinación de la dirección y velocidad de la corriente de deriva litoral se realizó durante los períodos de invierno y verano, empleando una modificación del método propuesto por King (1984), en el cual se mide el tiempo de flotación de un cuerpo conociendo su distancia. La figura 8 muestra el proceso de efecto que genera el rompimiento del oleaje al encuentro de una superficie firme; generando con ello una corriente llamada de deriva.

Figura 8. Corriente de deriva litoral



Fuente: Strahler, 1984.

Una observación importante para este modelo es la interpretación de deriva que se relaciona con dos factores elementales a considerar:

a. Cada dirección de oleaje entrante genera su propia corriente.

b. Debido a la modificación del Ecuador térmico y a la configuración de isobaras en el sistema atmosférico, la dirección de deriva se invierte de manera estacional (verano e invierno)
c. Estudio de las corrientes de retorno.

Como resultado de la dinámica del sistema de corrientes, se generan corrientes de retorno o *rip currents* (conocidas popularmente como "resaca"), las cuales se encargan del proceso local de erosión en la playa , transporte de sedimentos y depósito de éstos en el fondo submarino adyacente a la playa. Por tal motivo, se realizó la caracterización de la forma, longitud y localización de las corrientes de rip con el uso de fotografías aéreas, midiendo la longitud y posición de la misma con referencia a la línea de costa para determinar las áreas de erosión puntual y depósito de sedimentos (Figura 9).

Figura 9. A la izquierda, modelo teórico que representa a las corrientes de retorno tomado de Gutiérrez (2008); a la derecha, fotografía aérea que muestra las nubes de las corrientes de rip frente a la zona costera previa a la construcción del puerto industrial.



Fuente, CETENAL, 1970).

4. Levantamiento en campo de Croquis geomorfológico y obtención de perfiles de playa

Para obtener cartografía a detalle de los sectores costeros, se hizo un levantamiento de cartografía geomorfológica con escala a detalle siguiendo los criterios establecidos por Palacio (1985), adaptando la simbología geoformas y procesos costeros.

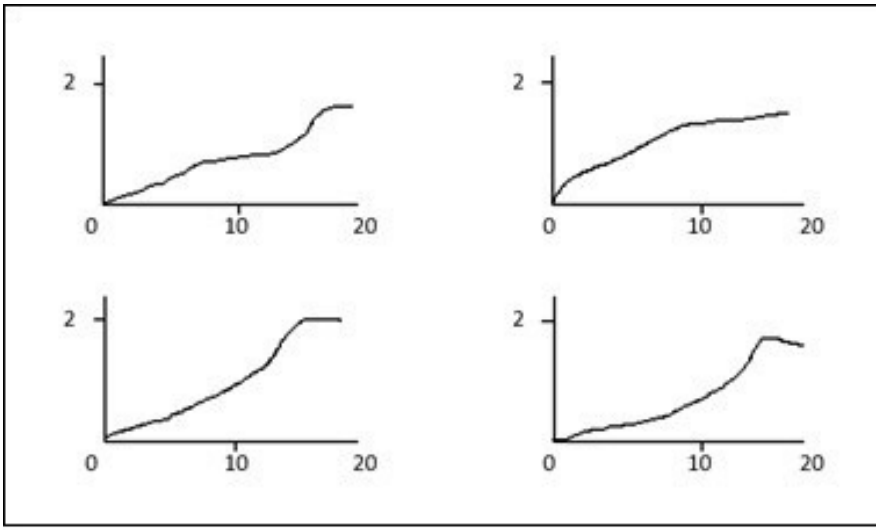
Este autor define que los objetivos del croquis se concentran en el reconocimiento, análisis de las geoformas y la distribución espacial de las mismas a través de diferentes etapas como la de preparación (recopilación de información documental y cartográfica), el reconocimiento del terreno y ratificación

de información previa; preparación y adaptación de la leyenda, el establecimiento de red preliminar de puntos de control topográfico, la definición preliminar de escala y el levantamiento de croquis.

Por otra parte, se realizó el levantamiento sistemático de perfiles geomorfológicos de la playa, considerando el transecto comprendido entre la zona de alta playa hasta la zona de lavado (*back wash*) durante los períodos de invierno y verano.

Los gráficos se construyeron en el mismo sitio para cada período anual referido con el propósito de comparar la morfología en cada sitio.

Figura 10. Perfiles de dos sectores de playa de los períodos de invierno (arriba) y de verano (abajo). La columna de los perfiles a la izquierda representa un mismo sector y las transformaciones locales de la morfología como los perfiles situados al lado derecho.



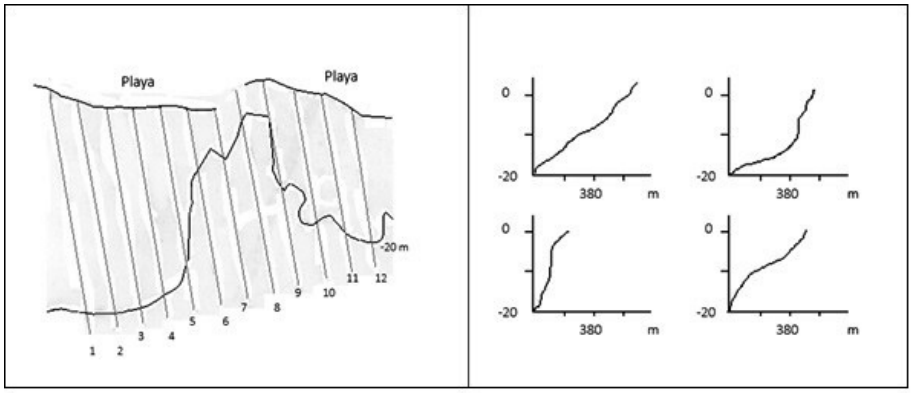
Fuente: elaboración propia.

En dichos sectores costeros, se realizó la toma de muestras de sedimentos para realizar el análisis granulométrico de los mismos, considerando para ello el criterio de muestreo sugerido por Lecuanda (2000) (información personal, 1989; Folk 1960 y Krimbeom,1960). Se obtienen bolsas de 1 kg en los primeros 10 centímetros de profundidad de la playa; y los sectores del perfil de playa mostrados (Figura 4).

5. Obtención de perfiles batimétricos

El proceso para conocer la erosión del sustrato submarino adyacente a la playa comenzó con el levantamiento de perfiles batimétricos, considerando la cartografía existente para la fecha ya referida de la Secretaría de Marina. Con curvas batimétricas equidistantes cada cinco metros, levantamiento sistemático (paralelo) de perfiles batimétricos con el propósito de conocer la morfología del fondo submarino adyacente a la línea de costa.

Figura 11. Localización general de la zona de levantamiento de perfiles batimétricos (izquierda), y ejemplo de los gráficos en los sectores 1, 4, 7 y 11



Fuente elaboración propia.

6. Valoración de la Energía del relieve

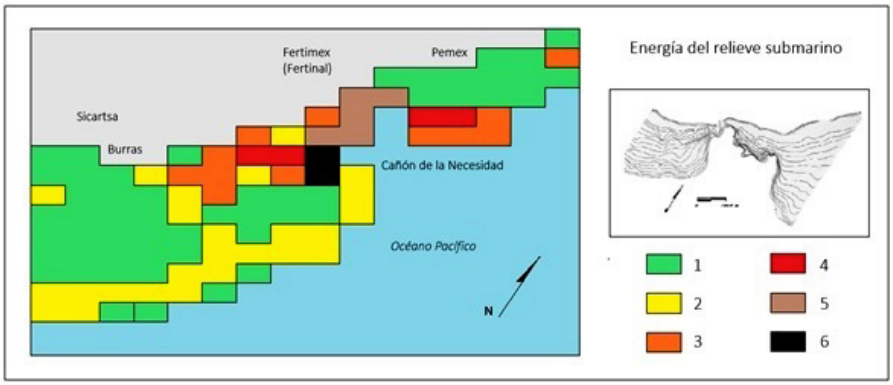
Asimismo, se realizó una carta original denominada "Energía de relieve submarino" que resulta de la modificación a la Carta de Energía del Relieve descrita por Lugo (1989). Con ésta se determinaron las zonas de mayor presión y tallado en los patrones energéticos del oleaje, y por consiguiente, las zonas de mayor erosión por debajo del nivel medio del mar (Figura 12).

El proceso de construcción de dicha carta se relaciona con los parámetros del oleaje (en profundidad):

- Velocidad de la ola en profundidad: Co
- Radio de la longitud de ola en metros y el período de tiempo medido en segundos: Lo/T
- Longitud de onda en profundidad
- Factor de velocidad : d > L/2

- Factor gravitacional: g (calculado en 980.62 cm/seg2 a una latitud de 45°)

Figura 12. Carta de Energía del relieve submarino.



Fuente: Modificada de Espinosa y Fuentes, 1991.

Estos parámetros sirven para conocer la relación entre los factores y la influencia que tienen el modelado aplicados por una parte diferente de la ecuación:

$$Co^2 = \frac{G\,Lo}{2p}$$ Ecuación 2

Luego cuando se tienen los valores de períodos de olaje, se emplea la siguiente ecuación (considerando que *Lo*: $1.56T^2$):

$$Co = \frac{g\,T}{2p} \quad 1.56\,T\,en\,m/seg$$ Ecuación 3

Para el caso de estudio, se consideró la segunda fórmula y la influencia de tallado en los patrones circulares y elípticos del oleaje con referencia a la batimetría (morfología del fondo), dirección predominante del patrón de oleaje. Asimismo, se conoce que conforme al patrón del oleaje se dirige hacia la costa disminuye la profundidad ($d < L/2$). El sistema individual de cada patrón de oleaje se modifica en varias maneras al aumentar la fricción con el fondo (de circular a elíptico) y la velocidad que disminuye (Cs). Dicho proceso se calcula a través de la fórmula:

$$Cs = \frac{g\,L}{2p} \quad \tan h \quad \frac{2p\,d}{L}$$ Ecuación 4

7. Análisis granulométrico de sedimentos

Se realiza la toma de muestras de sedimentos en los sectores de alta playa, *backwash* y zona intermareal de los perfiles de playa con el propósito de realizar el análisis granulométrico de las arenas para el período de verano como de invierno.

El análisis granulométrico se llevó a cabo bajo la técnica del Tubo de sedimentación de Emery, la cual inicia con el proceso previo de preparación de las muestras: cuarteo, lavado con peróxido, tamizado de finos y gruesos, secado y pesado en báscula analítica.

En segundo término, se realizó la calibración del tubo de sedimentación (relación entre tiempos de sedimentación-temperatura del agua-cantidad de la muestra pesada);

En este análisis el tubo se llenó con agua destilada con el propósito de evitar floculación y fricción; se introdujo la muestra de 3 gramos (de acuerdo con el criterio de relación entre capacidad de almacenamiento y volumen de la muestra en el tubo inferior gradado).

La escala de tamaños empleada para clasificar la granulometría de los sedimentos fue la de Wentworth (1922; Cuadro 3), la cual "es una escala logarítmica en que cada grado límite de la escala es dos veces mayor que el inmediato grado límite inferior. Actualmente en la mayoría de los trabajos sobre sedimentos, se usa la escala phi (f), propuesta por Krumbein, la cual presenta los datos más manejables ya que:

$$Phi\,(f) = -\log_2 D \qquad \text{Ecuación 5}$$

Donde
D = diámetro de la partícula en milímetros".

Una vez obtenidos los parámetros de sedimentación para determinar las propiedades granulométricas y formas de transporte y depósito de las arenas en cuestión, se procedió a la elaboración, cálculo e interpretación de los parámetros estadísticos correspondientes; además se determinó de la curtosis, asimetría y forma de transporte.

Con base en Krumbein (1952 y 1954), Folk (1965), Folk y Ward (1957). Las mediciones estadísticas básicas empleadas para la determinación de los parámetros de distribución de frecuencia de tamaños fueron:

a. Diámetro mediano gráfico (Md f): define el tamaño del 50% de las partículas -por peso o volumen son más grandes y el 50% más pequeñas (aproximadamente la moda en sedimentos unimodales).

b. Diámetro promedio (M f): refiere el tamaño promedio de las partículas (en términos de frecuencia por peso o volumen, no por número de partí-

culas) en general, diferida del diámetro medio cuando que la distribución de tamaños es perfectamente simétrica:

$$Mf = \frac{(f84 + f16)}{2}$$ Ecuación 6

Cuadro 3. Escala logarítmica de escala phi (f)

	Milímetros	Micrones	Phi f	Clases de tamaños Wentworth (1922)
	4096		- 12	
	1024		- 10	Canto rodado
	256		- 8	(-8 a 12 o)
	64		- 6	Guijarro
	16		- 4	
	4		- 2	Guija
	3.36		- 1.75	
	2.83		- 1.5	Gránulo
	2.38		- 1.25	
	2.0		- 1.0	
	1.68		- 0.75	
	1.41		- 0.5	Arena muy
	1.19		- 0.25	Gruesa
	1.00		0.0	
	0.84		0.25	
	0.71		0.5	Arena gruesa
	0.59		0.75	
1/2	0.50	500	1.0	
	0.42	420	1.25	
	0.35	350	1.5	Arena media
	0.30	300	1.75	
1/4	0.25	250	2.00	
	0.210	210	2.25	
	0.177	177	2.5	Arena fina
	0.149	149	2.75	
1/8	0.125	125	3.0	
	0.105	105	3.25	
	0.088	88	3.5	Arena muy fina
	0.074	74	3.75	
1/16	0.0625	62.5	4.0	
	0.053	53	4.25	
	0.044	44	4.5	Limo grueso
	0.037	37	4.75	
1/32	0.031	31	5.0	
1/64	0.0156	15.6	6.0	Limo mediano
Análisis por				
1/128	0.0078	7.8	7.0	Limo fino
1/256	0.0039	3.9	8.0	Limo muy fino
	0.0020	2.0	9.0	
Pipeta o	0.00098	0.98	10.0	Arcilla
Hidrómetro	0.00049	0.49	11.0	
	0.00024	0.24	12.0	
	0.00012	0.12	13.0	
	0.00006	0.06	14.0	

Fuente: elaborada con base en Wentworth 1922; y Krumbein (1952 y 1954).

c. Grado de distribución o clasificación de tamaño (sigma de phi (f) o desviación estándar del gráfico): es medida de dispersión de distribución del tamaño de frecuencia, conocido también como un índice de distribución o desviación estándar calculada (gráficamente aproximada) que indica la manera en como los granos se distribuyen hacia uno y otro lado del diámetro medio:

$$s\ f = \frac{f\,84 - f\,16}{2} \qquad \text{Ecuación 7}$$

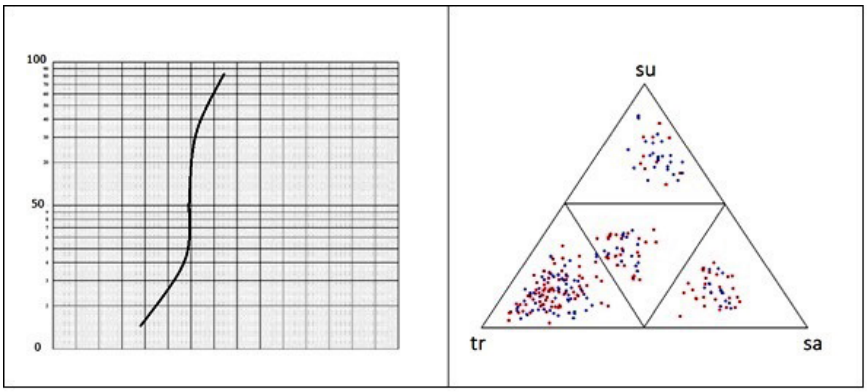
d. Skewness (Coeficiente de asimetría SK f): es la medida de la ubicuidad que se basa en la forma en cómo se separan entre sí la media y la mediana, a medida que la curva se vuelve asimétrica:

$$SK\,f = \frac{(M\,f - Md\,f)}{Sigma\ f\ (s\,f)} \qquad \text{Ecuación 8}$$

e. Kurtosis: medida de distribución de tamaño de frecuencia comparada con la configuración del tamaño de frecuencia de una log-normal (gaussiana).

Finalmente, la determinación de los sistemas de transporte de sedimentos se realizó de acuerdo con los principios del triángulo de distribución de texturas de Lecuanda (2000); donde el total de las muestras se agrupan para establecer si se trata de suspensitas, Saltitas o tractitas (Figura 13).

Figura 13. Sistema de transporte de sedimentos



Fuente: elaboración propia.

Nota: A la izquierda, gráfico en "S" de distribución poblacional de una muestra de sedimentos con base en el diámetro phi (f) de las partículas. A la derecha, triángulo poblacional de transporte de sedimentos donde el color azul representa muestras de arena recolectadas durante el período de invierno y de color rojo al

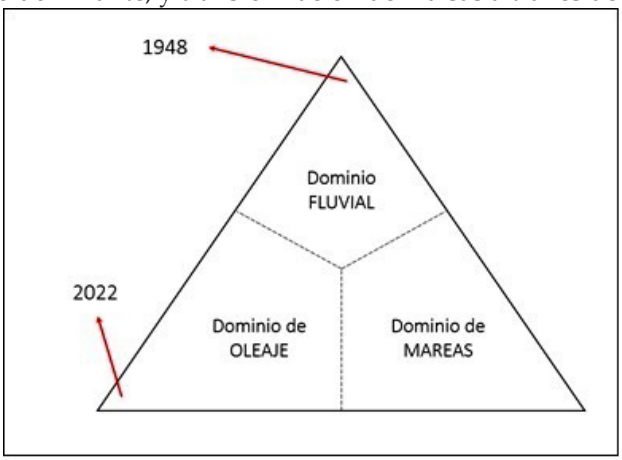
conjunto recolectado en verano. Las variables del triángulo identifican la forma de transporte: su: suspensión; tr: tracción y sa: saltación.

Conclusiones

Actualmente los cambios morfológicos se siguen presentando, lo cual significa que continuarán hasta que el sistema pueda crear una nueva fase de equilibrio (motivo por el cual se siguen realizando estudios en este comportamiento) de retroceso en la línea de costa y sus implicaciones desde una perspectiva geomorfológica de metodología empleada para el análisis de esta región que sugiere como elemento principal el estudio de otras regiones costeras circunscritas en diferentes fases metodológicas y uso de materiales que han permitido resolver los problemas de investigación planteados.

La Figura 14 De Pedraza (1991), muestra la transición del sistema costero en estudio, un sistema progradante de una línea de costa en retroceso hasta que el sistema encuentre nuevas condiciones de equilibrio. La degradación del frente deltaico exhibe importantes modificaciones en un período de 74 años, las cuales seguirán presentes, afectando con ello la infraestructura y equipamiento del puerto industrial.

Figura 14. Representación gráfica de los tipos de deltas clasificados por el proceso dominante; y transformación del Balsas a través del tiempo



Fuente: Elaboración propia. Con base en el modelo teórico de De Pedraza (1996).

Por otra parte, se establecen las referencias metodológicas descritas hace algunos años; en general, se adaptan de manera perfecta a estudios de Geomorfología costera, aunque queda claro que existen nuevos métodos y equipos, los cuales pueden aportar elementos de análisis. Asimismo, se reitera que

un análisis costero implica el estudio de los sistemas marino y terrígeno pues la omisión de alguno de ellos dejaría el estudio incompleto como la valoración de estos cambios durante los períodos estacionales debidas a las modificaciones barométricas.

Finalmente, en esta dinámica, el bagaje metodológico tiende a ser amplio, pues en un solo sector confluyen variables como la erosión, la depositación, la emergencia y subsidencia (hundimientos); combinaciones que podrían clasificar sectores costeros como progradantes (avance de la línea de costa), degradantes (retroceso de la línea de costa), estables o no definidos.

Bibliografía

Aagaard T., Brinkkemper J. Christensen D., Hughes M., Ruessink G. (2021). Surf zone turbulence and suspended sediment dynamics. A review. *Journal of Marine Science and Engeneering*. DOI 10.3390/jmse111300.

Aarninkhof S., Turner I., Dronkers T., Caljouw M., Npuis L. (2003). A video-bases technique for mapping intertidal beach bathymetry. *Coastal Engeneering 49*, 275-89.

Allen J. (2017). *Principles of Physical sedimentology*. Departament of Geology, University of Reading. Chapman & Hall

Allen L. (1970). *Physical processes of sedimentation*. Allen and Unwin, London, 248 pp.

Allen L. (1985). *Principles of physical sedimentology*. Allen and Unwin, London, 272 pp.

Almar R., Coco G., Bryan K., Huntley D., Short A., Senechal N. (2008). Video observations of beach cusp morphodynamics. *Marine Geology 216*(23): 254.

Anthony E., Héquette A. (2007.) The grain-size characterisation of coastal sand from the Sommme estuary to Belgium: sediment sorting processes and mixing an a tide and strorm dominated setting. *Journal Sedimentary Petrology*.

Arche A. (1989). Sedimentología. *CSIC Colección nuevas tendencias 11-112*, Madrid, 1072 pp.

Arche A. (2010). Sedimentología. Del proceso físico a la cuenca sedimentaria. *CSIC Textos Universitarios 46*, Madrid, 1287 pp.

Bertolini G., Marques J., Santos R. (2021). Determining sediment proverance history in a Godwanan erg. Botucatu formation., Morthern Paraná Brasil. *Journal Sedimentary Petrology.*

Boggs S. (2012). *Principles of sedimentology and stratigraphy*. Prentice Hall Boston. 585 p.

Brooks S., Spencer T., Cristie E. (2017). Storm impacts and shoreline recovery: mechanisms and impacts in Southern North Sea. *Geomorphology 283*, 48-60.

Brooks S., Spencer T., McIvor A., Möller I. (2016). Reconstructing and understanding the impacts of storms and surges, Southern North Sea. E*arth Surface proccess and landforms 41*, 855-854.

Burvingt O., Lerma A., Senechal N. (2022). Geomorphologycal control of Sandy beaches by a mixed-energy tidal inlet. *Marine Geology Journal, 451*, 106877.

Carranza E. (1989). *Estudio sedimentológico de las playas del Estado de Chiapas, México* Instituto de Ciencias del Mar y Limnología UNAM.

Castelle B., Dodet G., Masselink G., Scott T. (2017). A new climate index controling winter wave activity in w Europe: the West Europe pressure Anomaly (WEPA). *Gepophysical Research Letters 45*, 3586-3596 DOI 101002/2016GL072379.

Castelle B., Dodet G., Masselink G., Scott T. (2018). Increasd winter-mean wave height variability and periodicity in the Nort-East Atlantoc over 1949-2017. *Gepophysical Research Letters 45*, 3586-3596 DOI 101002/2017GL076884

Cervantes M. y Monroy S. (1989). *Características sedimentológicas y evolución morfológica submarina del Delta del Río Balsas.* Tesis de Ingeniería Geológica. UNAM.

Chassagne C., Safar Z. (2020). Corrigendum to Modelling flocculation: Towards an integration in large-scale sediment transport models. *Marine Geology 430*, 106361

Corbau C., greco M., Martino G., Olivo E., Simeonhi U. (2022). Assessment of vulnerability of the Lucana coastal zones (South Italy) to natural hazards. *Journal of Marine Science and Engeneering. 10*(7): 88 DOI 10.3390/jmse100670888.

Cruz O. R. (1966). S*edimentología de la Laguna de Tamiahua, Veracruz, México*. Tesis profesional ESIA, Instituto Politécnico Nacional, México. 100 pp.

D´Alessandro F., Tomasiccchio G., Frega F. (2022). Beach-dune system morphodynamics. Journal of Marine Science and Engeneering. 10(6): 802 DOI 10.3390/jmse1006802

De Pedraza J. 1996. *Principios de Geomorfología, principios, métodos y aplicaciones*. Editorial Rueda 414 pp.

De Vries J., Van Maanen B., Ruessink G., Verweij P., de Jong S. (2022). Multi decadal coasline dynamics in Surinam controlled by migrating subtidal mudbanks. *Earth Surface Proccess and Landforms*. DOI 10.1002/esp.5451 2500-2517.

Douglas L., McConchie DS. (1994). Analytical sedimentology. *Springer.* ISBN 978-4613-6131-2, Doi 10.1007/978-1-4615-2636-1

Emery K.O. (1938). Rapid method of mechanical analysis of sediments. *Journal Sedimentary Petrology*, vol. 8, no. 3.

Fairbridge W. y Bourgeois J. (1978). *The encyclopedia of Sedimentology*. Dowen, Hutcginson & Ross, Stroudsburg, 901 pp.

Fan V., Lan T. (2021) Reply to comment on Sediment Budget and morphologycal change in the Red River Delta under increasin human interferences. *Marine Geology*

Journal 431: 106379

Feist L., Frank S., Reicherter K. The sedimentological and Environment footprint of extrreme wave events in Boca del Rio, Algarve coast, Portugal. *Journal Sedimentary Petrology*.

Folk L. R. (1965). Petrology of sedimentary rocks. *Hemphillis Books Co.* Austin Texas pp. 17-43.

Folk y Ward (1957). Brazos river bar, a study in the significance a grain-size parameters *Journal Geology Petrol.* vol. 27, no. 3 - 27.

French J. (2009). Coastal Geomorphology: trends and challengers. Progress in Physical Geography: *Earth and Environment. 33* (1). DOI 10.1177/0309133309105036

Friedman M. y Sanders E. (1978). *Principles of sedimentology*. John Willey and Sons, New York, 792 pp.

Galloway E. y Hobbday K. (1983). *Terrigenous clastic depositional systems*.Springer-Verlang, Berlin, 423 pp.

Gijsman R., Ruessink B., Visscher J., Schlurmann T. (2020). Observations on decadal sandbar behavior along a large-scale curved shoreline. *Earth Surface Proccess and Landforms*. DOI 10.1002/esp. 5451 490-503

Gilbert K. (1914). *The transportation of debris by running water US*. Geol. Survey. Washington.

Hansom J. Fitton J. Rennie A. (2017). Dynamyc coast – National Coastal Change Assessment. *National overview*. CRW2014/2

Horton S., Dickson M., Stephenson W. (2022). The consecuences of upfit on wave transformation across a shore platform, Kaikoura, New Zeland. *Marine Geology Journal*, 451, 106877.

Hossain M., Yasir M., Zhao Z. (2020). Automatic shoreline extraction and change detection: A study in the southeast coast of Bangladesh. *Marine Geology* 430, 106361

Hurst M., Rood D., Ellis M., Anderson R., Dornbusch U. (2016). Recent acceleration in coastal Cliff retreat rates of the sout coast of Grain Britain. *PNAS* 113, 13336-13341.

Inman L. y Chamberlain (1955). Particle size distribution in near shore sediments En: *Finding Ancient Shorelines*. Soc. Econ. Paleont. Min. Spec. Publ: 3.

Isla M., Moyano D., Fitzgerald D. Somontacchi L., Veiga G. (2022). *Contrasting beach-ridge in different types of coastal settings Earth Surface Proccess and Landforms*. DOI 10.1002/esp.5429

Kasper J., Arellano E., Baltazar P. (2022). Implications of polymodal distributions in the grain size parameters of coastal dune sands (Oaxaca, Mexico). *Journal Sedimentary Petrology*.

Kranenborg J., Campmans G., Jacobsen N., van der Werf J. (2022). Deph-resolved

modelling in intra swash morphodynamics induced by solitary waves. Journal of Marine Science and Engeneering. 10(9): 1175. *Journal of Marine Science and Engeneering*. DOI 10.3390/jmse10091175.

King A.M.C. 1975. *Techniques in Geomorphology.* Ed. Arnold and Co. London England.

Kronn A., De Schipper M., De Vries S., Aarnikhof S. (2022). Subaqueous and subarial beach changes after implementation of a mega nourishment in front of a sea dike. *Journal of Marine Science and Engeneering*. 10(8): 1152DOI 10.3390/jmse100681152

Krumbein C. (1952). A history of the principles and methods of mechanical analysis. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 2, no. 2.

Krumbein C. (1954). Size frecuency distributions of sediments. *Journal Sedimentary Petrology,* vol 4.

Lecuanda R. (1993). Un triángulo para la representación poblacional e interpretación genética ede los sedimentos arenosos. *Ciencias marinas, 19*(1): 1-14.

Leeder M. (2012). Sedimentology. *Process and product*. Departament of Earth Sciences, Univerity of Leeds.

Leeder R. (1982). Sedimentology. *Process and products*. Allen & Unwin, London, Boston, 344 pp.

Leeder R. (1999). *Sedimentology and sedimentary basins: from turbulunce to tectonics*. Blackwell, Oxford 592 pp.

Li D., Xu Y., Wang L., Wang A., Lai X. (2022). Erosión and siltation dynamics in an urban influenced coastal setting, Xiamen Island, China. *Marine Geology Journal*, 451, 106877.

Lugo J. (1988). *Elementos de Geomorfología Aplicada (Métodos cartográficos).* Instituto de Geografía UNAM.

Nichols G. (2009). *Sedimentology and stratigraphy*. Wiley Blackwell. , Oxford 2 edition. 355 pp.

Pensantes J., Berh A., Sciaudone E. (2022). Importance of pre-storm morphologycal factors in determination of coastal highway vulnerability. *Journal of Marine Science and Engeneering 10*(8): 1158 DOI 10.3390/jmse10081158

Petropoulos A., Kapsimalis V., Evepidou N., Karkani A., Giannikopoulou K. (2022). Simulation the nearshore transport pattern and beach morphodynamics in the semi enclosed bay of Myrtos, Cephalonia Island, Ionian Sea. *Journal of Marine Science and Engeneering. 10*(8): 1015 DOI 10.3390/jmse10061015

Pettijhon. (1963). *Rocas Sedimentarias.* Ed. Eudeba. Tr. Juan Turner, Argentina.

Reading H. (ed) (1986). *Sedimentary environments and facies*. (2nd edition). Blackwell, Oxford 615 pp.

Reimintz and Gutierrez E. (1970). Rapid changes in the head of the rio Balsas subma-

rine canyon system, Mexico. *Marine Geology,* no.8, Elsevier Netherlands.

Reineck E. & Singh B. (1980). Depositional sedimentary environments-with reference terrigenous clastics. (2nd Edition). *Springer*, Berlin 549 pp.

Ricci-Lucchi F. (1980). *Sedimentología*. C.L.U.E.B. 3vol., 226, 222 y 545 pp.

Poate T., Masselink G., Dickson A., McCall R. (2017). The role of bed roughness in wave transformation acro0ss sloping rock shore platforms. *JGR Earth Surface, 123*(1):97-123 Doi.org/10.1002/2017JF004277

Scholle A. y Spearing D. (1983). Sandstone depositional environments. *AAPG Memoir* 33. Tulsa, 700 pp.

Selley C. (1976). *An introduction to sedimentology*. Academics Press, New York, 408 pp.

Selley C. (2000). *Applied sedimentology* (2nd Edition). Academic Press London, Vol. 22, no. 3. 523 pp.

Selley R. (2000). Applied sedimentology. Royal School of Mines. I*mperial College of Science, Technology and Medicine*. London, United Kingdom.

Sengupta S. (2017). I*ntroduction to sedimentology*. Routledge London. DOI 10.1201/9780203749883, 325 p.

Shaiful M., Akita N., nakamura T. Cho Y., Mizutani N. (2022). Experimental investigation onthe mechanism of longshore sediment transport using a circular wave basin. *Journal of Marine Science and Engeneering. 10*(9): 1189. DOI 10.3390/ jmse10091189.

Walker G. (1984). *Facies models*. Geoscience Canada, Reprint Series 1, 317 pp.

Wentworth K. (1922). A scale of grade classes sediments. *Journal Geology*, Vol 30.

Wentworth K. (1933). Fundamental limits the sizes of clastic grains. *Science*. New Ser. Vol. 77.

Capítulo 3. Geomorfología ambiental y su papel en la geografía constructiva

José Ramón Hernández Santana [1]
Ana Patricia Méndez Linares [2]
Luis Miguel Espinosa Rodríguez [3]

Introducción

La visión de la geografía como ciencia práctica a las soluciones de las problemáticas ambientales en su más amplio espectro - reconociendo al medio ambiente como el resultado de las interacciones espacio-temporales entre la naturaleza, la sociedad y su economía - en otras directrices del desarrollo, comienza a arraigarse a mediados del siglo XX. Esta necesidad del desarrollo práctico y aplicado de las ciencias geográficas comienza a florecer ante la devastación de ambas guerras mundiales, sobre todo en Europa, en el empeño de su compleja reconstrucción.

Una revisión en palabras de la literatura rusa, emprendida por uno de los autores, revela que durante el período de postguerra sale a la luz el concepto de geografía constructiva del académico ruso I. P. Guerasimov (1905-1985): aunque según Anochko (2011) el centro de la geografía aplicada en la antigua Unión Soviética radicaba en el Instituto de Geografía de Siberia (Irkutsk) concebido y desarrollado por el académico V. B. Sochava (1905-1978). La geografía constructiva de la escuela rusa, propone como rama del diseño a los problemas del desarrollo y transformación de la naturaleza el uso racional e integrado de los recursos naturales. Esta intención encuentra reflejo en la serie monográfica soviética "Problemas de la Geografía Constructiva", (1975 y editada en 1990).

1 Doctor en Ciencias Geográficas. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

2 Maestría en Ciencias Biológicas. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

3 Doctor en Geografía. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

Según Guerasimov (1963, 1966, 1976) "la base de la geografía constructiva está dirigida a la investigación sobre el desarrollo de la transformación planificada de las cuestiones del medio ambiente natural para hacer un uso efectivo de los recursos naturales" e identifica "cuatro áreas interrelacionadas: (a) desarrollo de la teoría y el desarrollo de programas de investigación previos a la transformación de la naturaleza con vistas al uso eficiente de los recursos naturales que diseña la formación y la reconstrucción de los complejos territoriales; (b) desarrollo de la teoría y la creación de modelos regionales para una distribución más racional de la producción social y fuerzas productivas del desarrollo de la economía del país y sus grandes unidades territoriales; (c) patrones de estudios en la población y solución al desarrollo de los asentamientos humanos en diferentes condiciones geográficas y (d) desarrollo de programas de investigación -la denominada planificación regional- garantizando las condiciones más favorables para la vida humana". Guerasimov (1976) señalaba que "la etapa actual, la geografía se ha convertido en una ciencia compleja, constructiva y transformadora".

Las ideas sobre la geografía constructiva fueron ampliamente difundidas en el Instituto de Geografía de la Academia de Ciencias de Cuba por D. A. Lilienberg (1928-2005) y J. Ya. Mashbits (1928-1997): discípulos y colaboradores del académico Guerasimov concibieron a mediados de los años 80, en pleno auge del proyecto sociopolítico cubano y de la colaboración socialista, la monografía cubano-soviética sobre la "Geografía Constructiva en Cuba", el cual quedó en el tintero de la historia al ocurrir la "perestroika soviética" y, el decaimiento y término de la colaboración bilateral. En este país caribeño, durante la década de los años 60, también surgió la serie "Transformación de la Naturaleza" editada por editorial Academia, adscrita a la Academia de Ciencias de Cuba; argumentaban proyectos con visión modificadora del espacio geográfico, algunos bastante ambiciosos y cuestionables, pero sin dejar de plasmar la importancia de la geografía en la planificación territorial, el manejo de los recursos y aprovechamiento de las condiciones naturales.

En el otoño de 2015, se desarrolla en la ciudad de Kostromá Rusia, la 19ª sesión del Consejo Científico sobre Problemas Geográficos Fundamentales de la Academia Rusa de Ciencias, bajo el tema "Ideas de geografía constructiva y desarrollo de la investigación geográfica fundamental" que presentan resultados palpables de las aplicaciones geográficas al desarrollo social y económico, a la preservación del patrimonio natural, terrestre, hídrico y marino (Averkieva *et al*., 2016); un balance y prueba del papel que la denomina geografía constructiva para el desarrollo armónico de las interacciones naturaleza-sociedad.

Hacia finales del siglo XX, los conceptos y contenidos de la geografía aplicada y constructiva avanzaron exitosamente y se retroalimentaron mutuamente, no existiendo contradicciones en sus respectivos alcances (Anochko,

2011). Según éste, los principales enfoques estaban dirigidos a "los aspectos metodológicos ingeniero-geomorfológicos para la conservación de la naturaleza; al pronóstico geográfico como instrumento de la geografía aplicada; al uso sostenible de los recursos naturales (con especial énfasis en los térreos y organización de las actividades agrícolas), a la determinación de las potencialidades naturales; métodos para estimar los impactos de la agricultura sobre el medio ambiente", entre otros. A su vez, según este autor, "la geografía aplicada se dividió en geografía física aplicada, geografía de los paisajes aplicada y geografía ingenieril". Olcina (2009) registra las siguientes concepciones: "Geografía Aplicada (Philipponneau, 1960), Geografía Activa o Dinámica (George *et al.*, 1966), la Geografía Constructiva (Guerasimov, 1963, 1966, 1976), Geografía Voluntaria (Labasse, 1973), Geografía Operativa (Lacoste, 1977) y Ecogeografía (Tricart y Kilian, 1982)".

Según Sánchez-Salazar *et al.* (inédito), otros geógrafos que impulsaron la concepción práctica de la geografía fueron los ingleses Dudley Stamp (1898-1966) y Robert W. Steel (1915-1997) que instaban "la aplicación de los conceptos, teorías y métodos geográficos en la solución de los problemas estructuro-funcionales de los distintos espacios" (Stamp, 1960; Steel, 1961). Por otra parte, las contribuciones de Michel Phlipponneau (1921-2008) "muestran los métodos y nuevos campos de intervención en la climatología, la geomorfología, la hidrología y la biogeografía, así como las aplicaciones de la geografía en el entorno, la ordenación del espacio y en las diferentes actividades humanas" (Ramírez Suárez, 2003).

El destacado geógrafo ibérico Vilá Valentí (1925-2020) afirmaba que "la geografía aplicada es imprescindible y base insoslayable de todas aquellas decisiones que afecten al espacio" (Vilá Valentí, 1968); mientras en México, Susana Levi (1970) conceptualiza a la geografía aplicada como "la orientación de los trabajos geográficos hacia la solución de problemas prácticos, donde la geografía deja la etapa descriptiva, para convertirse en una ciencia de aplicación". Todas estas posiciones son concordantes con el enfoque pragmático de la geografía estadounidense hasta nuestros días.

Dadas las complejas y crecientes problemáticas actuales que enfrenta la humanidad, resulta indispensable una mirada aplicada en las investigaciones geográficas en aras de propiciar la optimización del manejo de los territorios, contribuir a la mitigación de procesos cambiantes, como el clima y su repercusión en los asentamientos humanos como ecosistemas costeros y la gestión del riesgo ante otros fenómenos amenazantes ante innumerables situaciones de gran complejidad. En los últimos años la situación migratoria por problemas socioeconómicos y sociopolíticos se ha agudizado de manera gradual la migración de la población costera (hoy calculada alrededor del 60 % del orbe) hacia el interior de continentes e islas, debido al ascenso del nivel medio del mar. Una experiencia que debe tomarse en consideración por los geógrafos

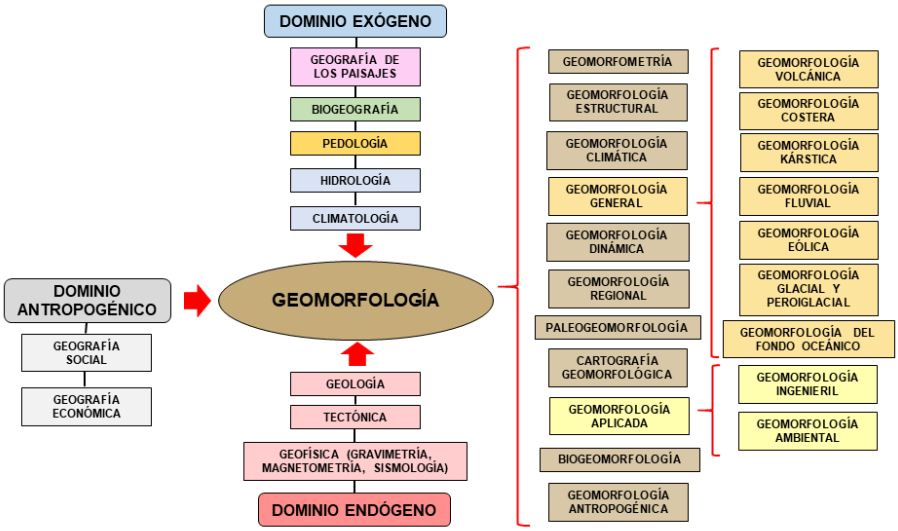
aplicados, sobre todo después del nefasto azote de la Covid-19, es el manejo de futuras epidemias y pandemias, pues de forma holística la geografía práctica pudo y puede desempeñar un papel esencial.

1. La geomorfología ambiental como expresión aplicada del estudio del relieve

El relieve de la superficie terrestre se delinea como una membrana que separa dos grandes dominios planetarios -el endógeno y el exógeno-, el primero representado por la estructura de la corteza terrestre y las características de sus campos geofísicos (gravimétrico, magnético, térmico y sísmico, y otros), así como la constitución geológica, sus diferentes tipos de deformaciones tectónicas y la actividad volcánica. Mientras el segundo, inherente a la acción de las fuerzas, los factores y los procesos geográficos externos, esculpen, modelan y retroalimentan al primero, bajo la yuxtaposición del dominio antropogénico. Por ello, la ciencia geomorfológica constituye una disciplina puente entre la geografía, geología, geofísica, geodesia, la hidrología, la oceanografía, entre las más involucradas a esta realidad interactiva.

Por su esencia compleja, la Geomorfología se divide en Geomorfometría (relacionada con la morfología y la morfometría del relieve), Geomorfología estructural o tectónica (estudia la estructura y la influencia de los mecanismos geotectónicos de su formación) según el análisis morfoestructural de la escuela rusa como la geotextura -unidades planetarias, relacionadas con los tipos de corteza y la geodinámica de las placas litosféricas - y la morfoestructura -reflejo de la estructura geológica en el relieve regional o local. Geomorfología climática (enfocada a las formas del relieve en función de los factores climáticos y de la zonalidad geográfica, indicando la morfoescultura); Geomorfología general (estudia el relieve bajo una clasificación crono-morfogenética cuando no se considera la edad surgen las representaciones de tipos morfogenéticos del relieve); Geomorfología dinámica (cuantifica las tendencias cuantitativas y cualitativas del desarrollo, tanto la morfoestructura como la morfoescultura), Geomorfología regional (dedicada al levantamiento geomorfológico de grandes territorios); Paleogeomorfología (enfocada a la historia y la evolución del relieve); Cartografía geomorfológica (dedicada a la representación multifacética del relieve, a diferentes escalas); Geomorfología aplicada (para la solución de problemas del desarrollo socioeconómico y otras direcciones) y Geomorfología ambiental (dirigida a la evaluación del relieve en aras de la gestión del medio ambiente, la ordenación territorial y la gestión de riesgos) (Figura 1).

Figura 1. Interrelaciones disciplinarias con la geomorfología y sus subdivisiones



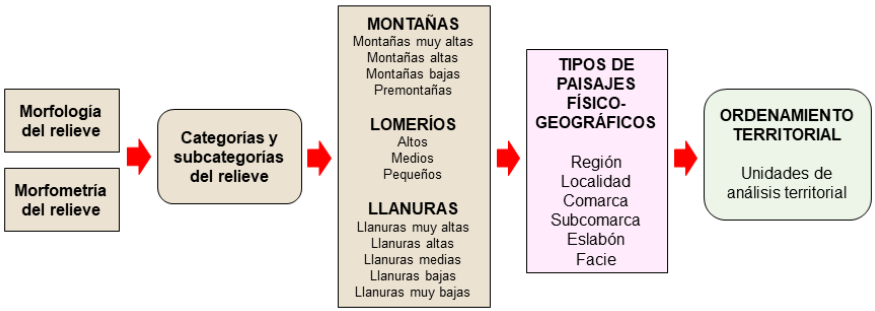
Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, procesos geólogo-geomorfológicos han propiciado la aparición y desarrollo de otras subdisciplinas como la Geomorfología volcánica, la Geomorfología kárstica, la Geomorfología fluvial, la Geomorfología glacial, la Geomorfología eólica y otras. Así en el Simposio "*Present-day geomorphological processes*" organizado por la Unión Geográfica Internacional y celebrado en la ciudad de Kanev, Ucrania (verano de 1976) se consolidan las bases de la Geomorfología Antropogénica clasificando estos procesos de acuerdo a sus efectos constructivos-edificativos y destructivos-extractivos.

Recientemente, aparece la Biogeomorfología fundamentada en la influencia del relieve sobre la formación y distribución espacial de los ecosistemas y la diversidad biológica, así como el papel de algunas especies en la aparición de geoformas biogénicas (siglo XIX) con la teoría de la biología evolutiva de Ch. R. Darwin (1809-1882) (Viles, 2008). Con un auge aparece la dendrogeomorfología que según Winchester (2004) "se basa en el análisis de los anillos de crecimiento anual en árboles o plantas leñosas y sus formas de crecimiento" con fines paleogeomorfológicos de reconstrucciones temporales del relieve y su datación. Y para el siglo XXI, los trabajos relacionados con esta rama enuncian la relación entre la Geomorfología con aspectos ecológicos (Ecogeomorfología) y ecosistémicos (boundaries).

Para finals del siglo XX y hasta la actualidad, la geografía aplicada y/o constructiva en comunión con la geomorfología ambiental y la geoecología moderna han contribuido al fortalecimiento de la geografía en los paisajes, clasificaciones tipológicas y definición de algunos de sus taxones en función del carácter del relieve emergido (categorías -montañas, lomeríos y llanuras- y subcategorías del relieve -montañas muy altas, altas, medias y bajas, premontañas; piedemontes; lomeríos altos, medios y bajos; llanuras muy altas, altas, medias, bajas y muy bajas) y de la constitución geológica como componentes estructurales en la arquitectura del paisaje. A su vez, este enfoque paisajístico (de evidentes controles geomorfológicos figura 2), constituye una de las bases para la definición de las unidades de análisis territorial en los procesos de ordenación del territorio, como para la evaluación del medio ambiente y su prognosis, mediante indicadores e índices biofísicos, sociales, económicos y de modificación antropogénica (Hernández-Santana *et al*., 2013a; Bollo-Manent *et al*., 2014).

Figura 2. Morfología y morfometría del relieve en la determinación de las categorías y subcategorías del relieve como base para la definición y delimitación de las localidades, comarcas y subcomarcas (taxones en los mapas de paisajes)



Fuente: elaboración propia.

La geomorfología ambiental, bajo el enfoque de la geografía constructiva y/o aplicada, está orientada a la evaluación de las potencialidades y limitaciones territoriales en las diversas actividades sectoriales como la agricultura, ganadería, silvicultura y el fomento forestal, desarrollo y expansión de asentamientos humanos, entre otros; considerando la ponderación de condiciones, características y procesos naturales. Ejemplo de estas evaluaciones se difunden en Bollo *et al*. (2010), en su último aspecto, esta visión resulta vital para la estimación del comportamiento anómalo de los procesos fluviales, gravitacionales o de remoción en masa, subsidencia tectónica y por compac-

tación sedimentaria; potenciales colapsos en zonas kársticas, repercusión de los estremecimientos sísmicos sobre las infraestructuras civiles y de población, así como otras manifestaciones y fenómenos naturales. Toda esta realidad representa amenazas, cuyos efectos están en función de los niveles de vulnerabilidad física y construida, configurando distintos niveles de riesgo que requieren una adecuada gestión.

Estas situaciones evidencian el significado preventivo y mitigativo de la geomorfología ambiental en la gestión del riesgo, especialmente en las regiones más frágiles y móviles como el relieve montañoso, las llanuras de inundación y terrazas fluviales bajas en depresiones estructurales o estrechos valles intramontanos; las llanuras costeras con notables cambios morfodinámicos hiperanuales y sus tendencias, las llanuras eólicas continentales y costeras en expansión acelerada, llanuras lacuno-palustres en zonas de subsidencia sostenida (por la tectónica como la compactación sedimentaria) escenarios de vulnerabilidad construida por la acción humana, entre los principales.

Toda la realidad geográfica externa del planeta, representada por el relieve de la superficie terrestre, es el zócalo sobre el cual descansan la existencia de la vida,y distribuye su hábitat, asentamientos y actividades productivas; paradójicamente, cualidades geomorfológicas que determinan sus niveles de estabilidad y viabilidad habitualmente ignoradas, en ocasiones, desafiadas por las autoridades político-administrativas sin sólidos argumentos científicos ni diseños ingenieriles que garanticen la longevidad constructiva y el progreso creciente de sus poblaciones. Esto amerita la reflexión de la necesidad de interrelaciones precisas entre la geomorfología ambiental, la planeación territorial y la creatividad ingenieril apoyadas por las autoridades gubernamentales y los actores sociales involucrados en los territorios.

2. Evaluación geomorfométrica del relieve: significado académico y sus aplicaciones sectoriales.

La geomorfometría estudia las características cuantitativas del relieve como altitudes (con respecto al nivel medio del mar) y alturas relativas (con respecto al nivel de base local); superficies, inclinaciones o pendientes (en grados o porcentajes); volúmenes a partir del análisis de la información topográfica reflejada en las curvas de nivel. Pocos países aplican estos métodos empleados con frecuencia por geógrafos y planeadores territoriales; uno de los antecedentes más lejanos se presenta en el mapa del relieve de Kazajstán, elaborado por A. A. Grigorieb (1944) que emplean las subcategorías del relieve con bases morfológico-morfométricas (Spiridonov, 1974). No obstante, como refieren Hernández-Santana *et al*. (2017) son escasos los intentos geomorfométricos en atlas nacionales, aunque en América Latina sobresalen los casos de Cuba (1970 y 1989) y México (1990).

Son varios diseños de índices geomorfométricos empleados para la hipsometría (altimetría), la energía del relieve, la profundidad de disección vertical, la densidad de disección horizontal, el grado de inclinación de las laderas o pendientes y, a la vez, son los más relacionados con las decisiones de planeación agrícola, ganadera o forestal, entre otras actividades productivas importantes. Algunas representaciones cartográficas de la morfometría del relieve incluyen:

- Morfoisohipsas: consiste en la generalización de las curvas de nivel, despreciando los patrones erosivos de la modelación; se elabora para reconstrucciones paleotectónicas del relieve, con el propósito de utilizar sus estructuras originales. Este método es empleado con frecuencia en la prospección geólogo-tectónica con fines mineros y en levantamientos estructuro-geomorfológicos como se ilustra en los trabajos de Lamadrid y Horta (1979), y de Pérez-Peña *et al*. (2016).
- Isobasitas o líneas de idénticos niveles de base para diferentes órdenes fluviales: aplicados al análisis estructuro-tectónico. Su procesamiento clasifica las órdenes fluviales de acuerdo con Strahler (1952): en ríos de primero, segundo y tercer órdenes, y para trazar las líneas de idénticas bases de erosión con los patrones originales del relieve más claros; acercándose al diseño estructural original de su configuración. A partir de los años 70 estos métodos fueron empleados con frecuencia por la Dirección General de Geología y Geofísica del Ministerio de la Industria Básica de Cuba, Orbera *et al*. (1977), Sagripanti *et al*. (1998) y, más recientemente, por Rosabal-Domínguez *et al.* (2016) y Arias-González (2017) para todo el país y algunos municipios de Cuba oriental, con fines estructuro-geológicos.

Densidad de geoformas específicas: para diferenciar la intensidad del modelado exógeno, ya sea de carácter erosivo, kárstico, gravitacional u otro en las diferetes regiones. Por ello, se establece una unidad de área homogénea para contabilizar el número de geoformas resultantes por esta unidad. El análisis y la representación cartográfica pueden considerar la densidad de geoformas o cuantificar su área por la unidad superficial establecida. Posteriormente, se pueden establecer cartogramas con un fondo de color cualitativo que sea directamente proporcional la correspondencia entre las altas densidades y los tonos más fuertes; también se pueden elaborar cartodiagramas de porcentajes con diferentes formas del relieve. Por ejemplo, este tipo de representación cartográfica permite conocer, de manera diferenciada, la intensidad de los procesos kársticos de una región, distinguir zonas con alta densidad de procesos gravitacionales o con un desarrollo erosivo intenso y extenso, según el proceso imperante o que se desee analizar. Para la elaboración de mapas con

intensidad geomórfica (intensidad general o específica de procesos geomórficos exógenos) es vital la realización previa de este tipo de inventario. A continuación, se exponen los métodos más empleados y algunas consideraciones sobre la base de la experiencia de su aplicación.

2.1 Hipsometría o altimetría

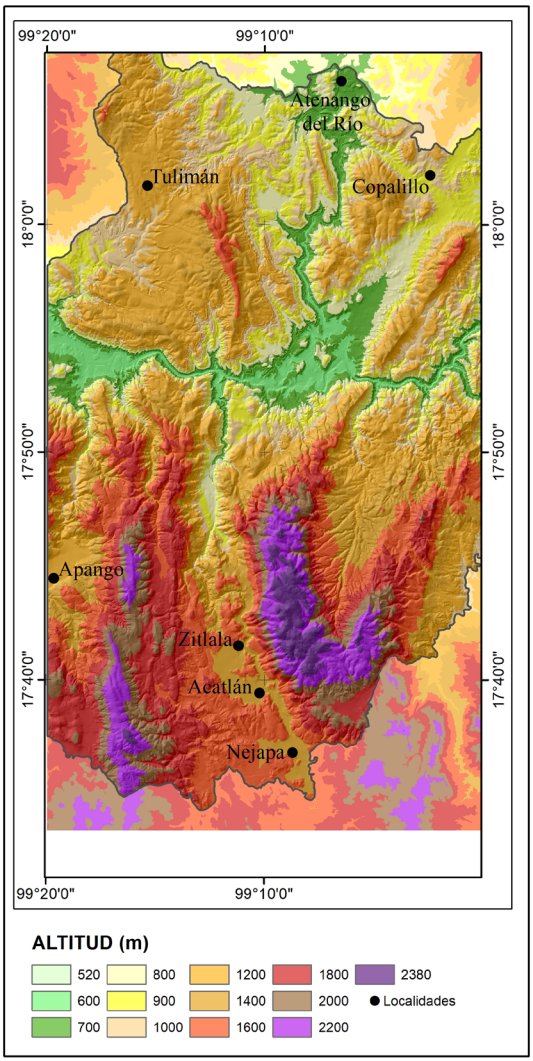
Por definición, la hipsometría refleja los distintos niveles altimétricos del relieve (con respecto al nivel medio del mar) clasificados según la escala del mapa topográfico, su nivel de información, la equidistancia seleccionada entre curvas de nivel y las dimensiones del territorio a estudiar. Una vez escogidos los intervalos entre las curvas de nivel, ya sean cada 20 metros para una escala 1:50 000, en territorios llanos, colinosos, alomados y hasta premontañosos, o cada 100 metros para una escala 1:250 000, o cada 500 m para una escala de 1:1000000 en territorios montañosos nacionales, se procede a designar un fondo de color cualitativo en cada intervalo; velando por la plasticidad colorimétrica y el resultado artístico cartográfico. De manera general, los intervalos de las llanuras muy bajas y bajas asumen tonos verdes, las medianas a altas con tonos amarillos, los lomeríos con tonos naranja y rosados; las premontañas a montañas con tonos de beige a café. En el caso de relieves muy montañosos, se pueden añadir el rojo, morado y blanco; este último en zonas glaciales.

En el caso hipsométrico, los tonos colorimétricos se acentúan hacia los niveles más altos, mientras los más bajos son los más claros. Sin embargo, el interés descansa en mostrar solo la edad del relieve, la filosofía cartográfica, pues entonces los niveles más bajos y los más jóvenes tendrían los tonos más fuertes, expresando la vigorosidad de la juventud, mientras los niveles más altos y antiguos, aparecerían con colores pálidos, indicando su senectud.

Como se puede apreciar en la figura 3, este tipo de representación del relieve permite obtener una caracterización cuantitativa compleja, proporcionando datos preliminares sobre la intensidad de los movimientos neotectónicos y su distribución espacial; espectro de categorías y subcategorías del relieve como su grado de disección vertical u horizontal explicados más adelante. Cuando se estudian regiones de grandes dimensiones con relieves de alta energía debido a la densidad de curvas de nivel en las montañas, es necesario establecer equidistancias más grandes entre las mismas; mientras que las regiones llanas, onduladas y colinosas, incluso alomadas, las equidistancias deben reducirse. Para levantamientos LiDAR con mayor nivel de información, las equidistancias deben ser menores logrando una mayor precisión. Por otro lado, la presencia de un relieve vigoroso en las zonas tropicales y templadas determina las variables climáticas con la altitud, considerada como un efecto del carácter azonal del relieve en el contexto de la zonalidad climática del planeta.

Por ello conociendo el comportamiento de estas variables en los diferentes niveles altimétricos, es factible la elaboración de mapas hipsométricos para fines del fomento de plantaciones o de cultivos específicos, buscando las condiciones microclimáticas óptimas para su desarrollo y sus altos rendimientos.

Figura 3. Mapa hipsométrico de las montañas de Atenango del Río-Chilapa de Álvarez, estado de Guerrero, México



Fuente: elaboración propia, en apoyo a Emilio Martínez Flores.

La morfología y morfometría del relieve constituyen la expresión tridimensional del proceso interactivo entre los diferentes factores edificado y modelado de la superficie terrestre. Un primer análisis se enfoca a la diferenciación de sus niveles hipsométricos (altimétricos) para poder establecer las dimensiones de sus edificaciones y a la interpretación de los patrones orográficos delineados por las curvas de nivel que expresan el grado de disección o desmembramiento del terreno. La inserción de los patrones oro-hidrográficos en los mapas morfométricos contribuye a una lectura cartográfica e interpretación más práctica para otros profesionales no geomorfólogos, funcionarios y público en general.

2.2 Unidades geomorfométricas del relieve

Este análisis permite identificar el grado de diferencia en la superficie terrestre que expresa no solo la morfología y la morfometría de las categorías y subcategorías del relieve, sino la estatura de sus edificaciones. En el caso de las llanuras, sus subcategorías, determinadas por el nivel de base marino o local -altitud (H) o altura relativa (h)- estarían enlazadas de cierta manera con las irregularidades del relieve en llanuras muy bajas, planas; llanuras bajas, de planas a onduladas; llanuras medianas, de onduladas a colinosas; llanuras altas, colinosas; y llanuras muy altas, muy colinosas. Esta relación dual anuda la subcategoría del relieve dependiente de la altitud o altura relativa local con sus rasgos morfológicos y su grado de modelación en los procesos geomórficos exógenos (erosión fluvial, abrasión marina, deflación eólica, y otros) ya en sus facetas destructivas o acumulativas.

A su vez, en condiciones litológicas similares, las inclinaciones de sus superficies también deben exponer una gradación acorde a su morfología y sus cualidades morfométricas, por ejemplo, la aproximación generalizada del caso de las llanuras: muy bajas; planas de 0 a 1°; en bajas; de planas a onduladas de 1.1° a 3°; medianas; de onduladas a colinosas de 3.1° a 6°; altas; colinosas de 6.1° a 12°, y muy altas; muy colinosas de 12.1° a 16°. De esta manera, se integran la morfología con dos atributos morfométricos, la altitud o altura relativa y la inclinación de sus superficies o pendientes en grados.

En el caso anterior, las investigaciones para la planeación de actividades productivas del sector primario como la agricultura, ganadería y el desarrollo forestal, disponen de varios atributos geomorfométricos del relieve territorial que propicia el diseño de la distribución espacial en los diferentes usos de suelo. Por supuesto, además de estos atributos geomorfológicos, se requieren otros de carácter físico-geográfico como pedológicos, hidrológicos, climáticos, etc. La faceta geomorfológica es la plataforma estructural sobre la que se desarrollan los otros componentes del paisaje y es la que se analiza en este capítulo.

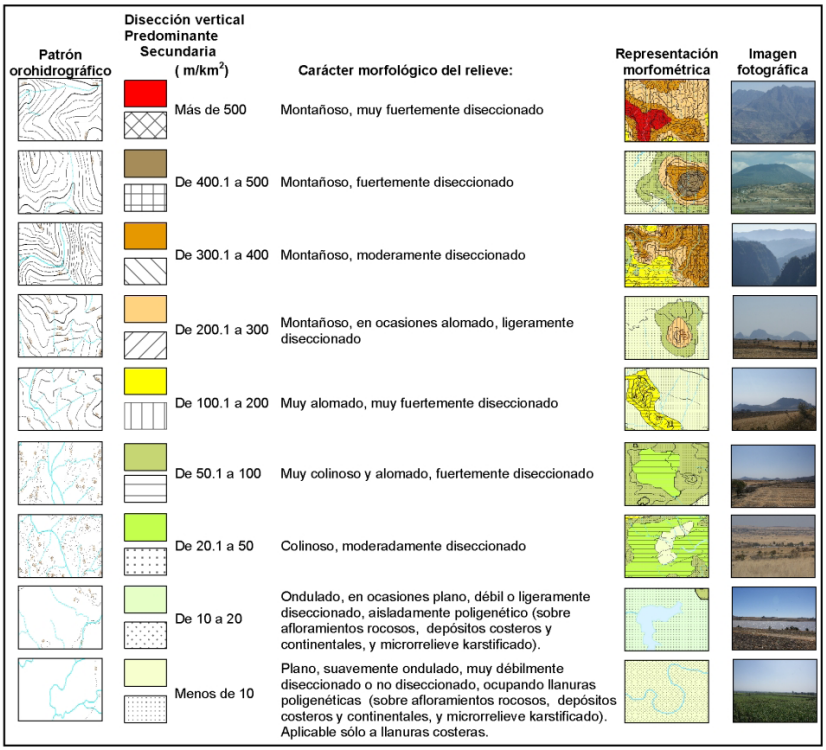
Una visión más integral queda robustecida en el análisis espacial de varios índices geomorfométricos como la morfografía y la energía del relieve procesados con sistemas de información geográfica (ArcView, ArcGis, ArcInfo, QGIS), como de información topográfica digital (INEGI), en una escala adecuada para fines de la investigación aplicada. Mientras más reducida sea la equidistancia entre las curvas de nivel, mejor será el resultado a lograr.

Para este tipo de análisis espacial integrado por los rasgos morfológicos, expresados con la densidad de curvas de nivel (km/km^2) y de la energía del relieve como indicador de la profundidad de disección (en m), se establecen para cada uno los pasos siguientes:

a. Elaboración del mapa de la morfografía del terreno mediante el cálculo de la densidad de curvas de nivel por unidad de área (km/km^2), en formato vectorial con los valores continuos de las curvas de nivel. Para determinar los rangos, se reclasifican los datos y se aplica un análisis estadístico espacial de la desviación estándar, identificando los rangos que mejor representan la distribución espacial de la información para posteriormente proceder a su generalización y determinar el área mínima cartografiable. Finalmente, se suavizan y/o simplifican los límites geográficos para lograr un mayor acercamiento con la realidad del relieve analizado.
b. Elaboración del mapa de la energía del relieve luego de calcular la diferencia de alturas por km^2. Para ello, se construye el modelo digital de elevación con la mayor resolución espacial, de acuerdo con la escala y el propósito aplicado en el análisis y cálculo de la altura máxima y mínima (km^2) así como la resta de la segunda con respecto a la primera. Una vez realizado este cálculo, se reclasifican los datos para determinar los rangos de la energía del relieve y generalizar espacialmente la información.

Finalmente, se superponen los resultados de la energía del relieve sobre la morfografía, quedando expresadas sus diferentes clases o rangos de energía en cada contorno morfográfico. Para una mejor comprensión en la lectura cartográfica, se prepara la leyenda correlacionanda con el patrón orohidrográfico, su clase de disección vertical correspondiente, indicando los valores de sus intervalos (en m/km^2), el carácter morfológico del relieve; un fragmento de la representación para esa clase y fotografía oblicua del relieve (Figuras 4 y 6) con miras a la lectura de personas no especializadas.

Figura 4. Ejemplo de leyenda para el mapa de unidades geomorfométricas del relieve



Fuente: tomado del mapa nacional mexicano, 122 hojas cartográficas a escala 1:250 000 (Pérez-Damián *et al*., 2011; Hernández-Santana *et al*., 2017), financiado por el Instituto de Ecología, SEMARNAT, en 2013.

2.3 Densidad de disección o disección horizontal

Uno de los métodos empleados en morfometría es el cálculo de la densidad de disección en la red erosiva que ofrece diferentes grados de desmembramiento, lo que resulta de gran utilidad para determinar aquellos sitios favorables a las actividades agrícolas, siendo mecanizadas o no al igual que la ocupación del fomento ganadero u otras actividades productivas que requieran grandes extensiones.

La información cartográfica de este indicador también puede ser de uso estratégico y táctico en las operaciones militares, con fines bélicos como propósitos de protección, auxilio y rescate civil durante fenómenos naturales adversos sin olvidar el Plan DN-III-E de la Secretaría de la Defensa Nacional (SEDENA) de México. Para el teatro de operaciones militares donde se

desarrollan grandes desplazamientos de tropas y equipamientos, conocer la densidad de cauces fluviales por unidad de área, permite seleccionar las rutas óptimas y esquivar el desempeño de obras de ingeniería militar para poder vencer estos obstáculos erosivos. Igualmente, una visión temprana y previa en la elaboración del trazado de una vía de comunicación permite identificar las zonas de menor costo, debido a la reducción de obras civiles como puentes y alcantarillas, haciendo eficiente el gasto presupuestario.

La densidad de disección se calcula midiendo la longitud de la red fluvial por unidad de área que se expresa en km/km^2. Esta unidad de área se determina en función del nivel de detalle y la escala de la representación.

2.4 Inclinación de las laderas o pendientes, en grados y porcentajes.

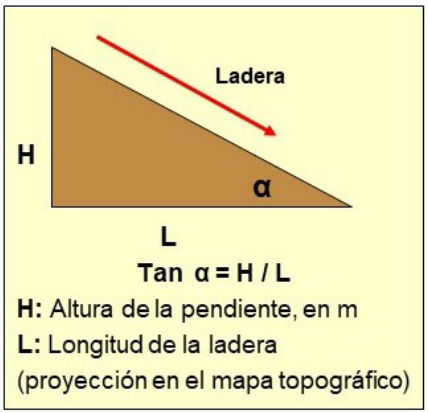
El concepto de pendiente es empleado con frecuencia en las ciencias básicas, geociencias y naturales para diferentes tipos de cálculo y procesamientos estadísticos.

El desempeño matemático se refiere a la inclinación de la recta con respecto al eje de las abscisas, mientras que geomorfología se concibe como la inclinación de una superficie y/o ladera con respecto al nivel de base. En el caso de una ladera uniforme pues en su longitud total puede existir distintos cambios de inclinación debido a influencias tectónicas, erosivas, disolutivas; estas últimas relacionadas con la componente litológica de su estructura. Por ello, el perfil de ladera está constituido por sectores con diferente inclinación y puntos de cambio, una llamada ruptura de pendiente.

La pendiente se mide calculando la tangente del ángulo de inclinación de la ladera que sería dividiendo la diferencia altimétrica de sus puntos extremos, entre la longitud de su proyección planimétrica (Figura 5). En estudios geomorfológicos y geográficos, la pendiente se expresa en grados, mientras en ingeniería e hidrología se acostumbra la representación en porcentaje. El Cuadro 1 presenta la conversión de ambas unidades de medida, a menudo necesarias para poder comparar resultados ingenieriles en porcentajes con los estudios geomorfológicos, en grados.

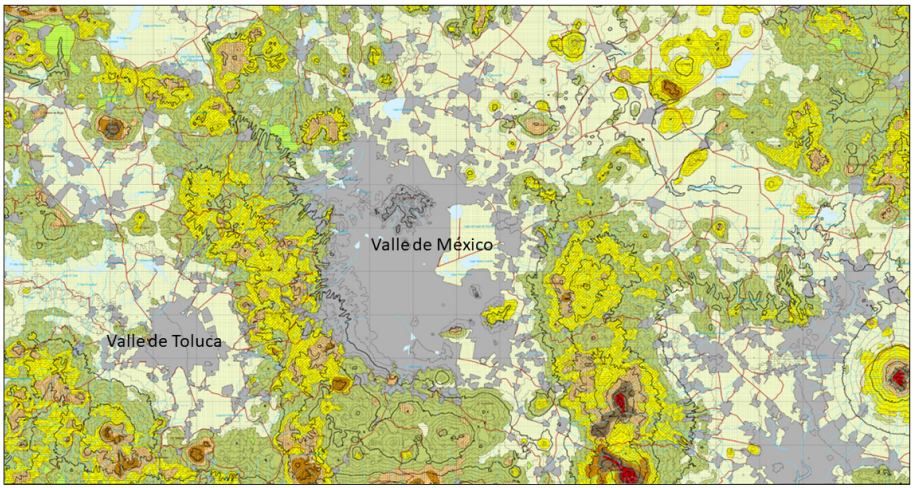
La elaboración del mapa de pendientes (Figura 7) es de gran significado para el ordenamiento óptimo de las actividades agrícolas, ganaderas y forestales; tanto para mitigar procesos erosivos como alcanzar altos rendimientos. La selección de trazados de vías de comunicación y sistemas de drenaje, esquivan aquellos sectores con dificultades geólogo-geomorfológicas para el diseño de asentamientos humanos ante procesos de remoción en masa de las regiones montañosas (entre muchos usos prácticos).

Figura 5. Expresiones geométrica y trigonométrica de las pendientes



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Mapa de unidades morfométricas del relieve de la hoja E14-2 de la Ciudad de México



Fuente: Pérez-Damián *et al.*, 2011.

Para el desarrollo agrícola es vital el grado de inclinación de las laderas y /o superficies, lo que limita la actividad en la medida que aumenta ya que se debe considerar el tipo de cultivo, pues varias plantaciones como el café y cacao prosperan en vertientes pronunciadas, incluso con altos rendimien-

tos. Desde el punto de vista de la mecanización, Kuyler (1978, en Seco, 1998) propuso la clasificación siguiente: "de 0º a 2º, no existen dificultades para la agricultura; de 2.1º a 6º, comienzan las dificultades para la mecanización agrícola; de 6.1º a 12º, esta dificultad se presenta para el uso de maquinarias cosechadoras pesadas; de 12.1º a 18º, queda restringido el uso de tractores y otros equipos; y mayor a 18º, resulta imposible el empleo de la mecanización pesada". Valoraciones de potenciales naturales para la agricultura con un enfoque holístico abordando en Bollo *et al*. (2010) para la porción noroeste del estado chiapaneco.

Cuadro 1. Ministerio de Alimentación, Agricultura y Medio ambiente, 2014

%	Ángulo	%	Ángulo	%	Ángulo	%	Ángulo
1	35´	26	14º34´	51	27º01´	76	37º14´
2	1º09´	27	15º07´	52	27º29´	77	37º36´
3	1º43´	28	15º39´	53	27º56´	78	38º00´
4	2º17´	29	16º10´	54	28º22´	79	38º19´
5	2º52´	30	16º42´	55	28º49´	80	38º40´
6	3º26´	31	17º13´	56	29º15´	81	39º00´
7	4º00´	32	17º45´	57	29º41´	82	39º21´
8	4º34´	33	18º16´	58	30º07´	83	39º42´
9	5º09´	34	18º47´	59	30º33´	84	40º00´
10	5º43´	35	19º17´	60	31º00´	85	40º22´
11	6º17´	36	19º48´	61	31º23´	86	40º42´
12	6º51´	37	20º18´	62	31º48´	87	41º00´
13	7º24´	38	20º48´	63	32º13´	88	41º21´
14	7º58´	39	21º18´	64	32º37´	89	41º40´
15	8º32´	40	21º48´	65	33º00´	90	42º00´
16	9º05´	41	22º18´	66	33º26´	91	42º18´
17	9º39´	42	22º47´	67	33º49´	92	42º37´
18	10º12´	43	23º16´	68	34º14´	93	43º00´
19	10º12´	44	23º45´	69	34º36´	94	43º14´
20	11º19´	45	24º14´	70	35º00´	95	43º32´
21	11º52´	46	24º42´	71	35º23´	96	43º50´
22	12º24´	47	25º10´	72	35º45´	97	44º00´
23	13º13´	48	25º39´	73	36º08´	98	44º25´
24	13º30´	49	26º06´	74	36º30´	99	44º43´
25	14º02´	50	26º34´	75	36º52´	100	45º00´

Fuente: guía para la elaboración de estudios del medio físico. España.

3. Categorías y subcategorías del relieve: base para la diferenciación de los paisajes físico-geográficos, como unidades de análisis territorial

La distribución y diferenciación de los paisajes físico-geográficos dependen de las condiciones de la zonalidad geográfica, determinada básicamente por la inclinación del eje terrestre, la esfericidad planetaria, la desigual repartición de la energía solar y la variabilidad estacional. Este escenario no es uniforme a nivel global, pues se modifica por el carácter azonal del relieve; obligando a distinguir los diferentes escalones hipsométricos (altimétricos) que delinean sus categorías y subcategorías (Cuadro 2) para establecer el comportamiento de las restantes componentes físico-geográficas en su dimensión vertical.

La formación de estas categorías y subcategorías diferenciadas por la estatura de sus edificaciones está regida por la historia de los procesos tectónicos regionales y/o locales y por los cambios glacio-eustáticos del nivel medio del mar; estos últimos en las llanuras costeras. Para calcular y establecer espectros altimétricos en cualquier escala cartográfica, es necesario identificar y trazar las superficies máximas de planación (cumbrales), tanto areales (altiplanicies y mesetas), puntuales (cumbres y picos) y, en ocasiones, las lineales (parteaguas principales). En este proceso de identificación, discriminación y agrupamiento deben excluirse los niveles erosivos fluviales o de otra génesis localizada en el interior de las cuencas hidrográficas, pues ellos responden al modelado exógeno y son niveles testigo de las pulsaciones tectónicas de impacto en su desarrollo.

Una vez identificados los restos máximos de superficies de planación, se procede a su agrupamiento tomando en consideración distintos indicadores morfométricos como los rasgos morfológicos (plano, ondulado, colinoso, poco diseccionado, diseccionado, muy diseccionado, etc.). Para levantamientos menores a la escala 1:50 000 y bajo la visión de un SIG, estas categorías y subcategorías del relieve constituyen los polígonos a caracterizar bajo distintos enfoques geomorfológicos (morfoestructural, morfogenético y morfodinámico), pero a escalas más grandes y detalladas cambiando su papel de polígono-tipo de subcategorías a ocupar una posición en los niveles jerárquicos de la clasificación tipológica y su leyenda, dado que a detalle se emplean otras geoformas y morfoelementos como laderas, planos de inundación, terrazas fluviales y marinas entre las más frecuentes. La definición del espectro hipsométrico de las categorías y subcategorías también demanda de la correspondencia de otros indicadores e índices morfométricos como la energía del relieve, la profundidad y densidad de disección (Figura 8).

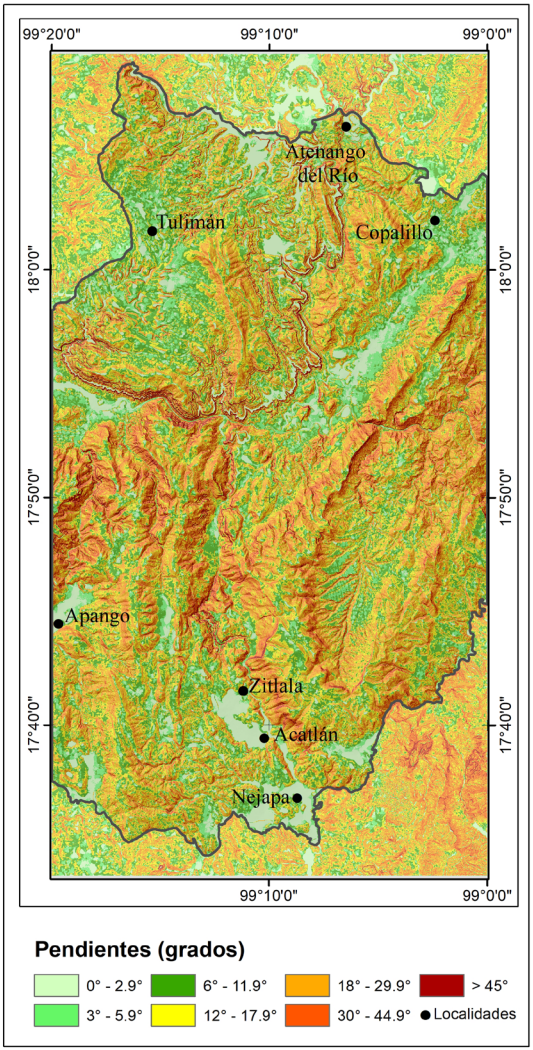
La identificación, clasificación y representación cartográfica de las categorías y subcategorías expresan las manifestaciones de la azonalidad del relieve en una región determinada junto con la constitución geológica y el régimen

neotectónico de la corteza terrestre, reflejan la consolidación en sus diferentes escalones morfoestructurales, esculpidos por el modelado de los procesos geomórficos exógenos. Ambos componentes -constitución geológica y relieve- se definen como elementos de la arquitectura paisajística que determinan la distribución y el carácter de otros componentes más dinámicos y cambiantes en períodos históricos a corto tiempo como la hidro-climática y la edáfica-biótica. Por supuesto, que la componente estructuro-tectónica también está sometida a cambios temporales más lentos, pero bajo la dinámica del tiempo geológico.

La clasificación de los paisajes considera unidades morfológicas (facie, eslabón, subcomarca, comarca, localidad, región y otras de mayor extensión) que responden al índice de diagnóstico basado en la complejidad estructural del geosistema (Bollo *et al*., 2008). A su vez, estos índices de diagnóstico y unidades morfológicas del paisaje están ligados y soportados por índices de carácter geomorfológico, geológico y otros con lo que se elabora la representación cartográfica de los paisajes. Estas correlaciones pueden valorarse en la propuesta de Vidina (1970, en Mateo, 1994) modificada por Bollo *et al*. (2008).

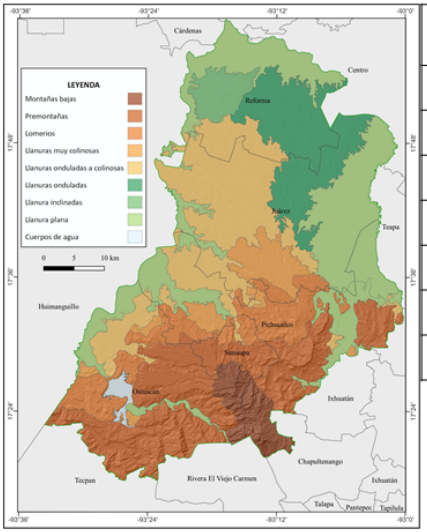
Para la gestión ambiental y trabajos de ordenación territorial es indispensable el empleo de unidades de análisis espacial que emplea diversas apreciaciones científicas como cuencas hidrográficas (SEMARNAT, 2013); unidades ambientales biofísicas (Verstappen y Van Zuidam, 1991; López-Blanco, 2007), unidades ambientales de análisis (Barragán, 2003; Ospino-Sepulveda y López-Rodríguez, 2019), unidades ambientales integradas (Navarro, 2019) y unidades de paisajes físico-geográficos (Bollo-Manent *et al*., 2008). Una vez establecido el tipo de criterio, se procede a la evaluación de la aptitud natural de cada unidad de análisis como oferta para el desarrollo socioeconómico evaluación del estado y su medio ambiente actual de escenarios futuros, tomando en cuenta indicadores biofísicos, sociales, económicos y de modificación antropogénica como de carácter en las sinergias y/o conflictos intersectoriales respetando con la propuesta de políticas ambientales de aprovechamiento sustentable, preservación, protección y/o restauración; y a la elaboración del modelo de ocupación de las diferentes actividades del desarrollo regional o local (Figura 9). Los procesos de esta naturaleza se pueden consultar en los resultados del Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio, México, decretado el siete de octubre del año 2012 y disponibles en Hernández-Santana *et al.* (2013a, 2013b, 2016) y Bollo-Manent *et al*. (2014).

Figura 7. Mapa de pendientes de las montañas de Atenango del Río-Chilapa de Álvarez, estado de Guerrero, México



Fuente: elaboración propia, en apoyo a Emilio Martínez Flores.

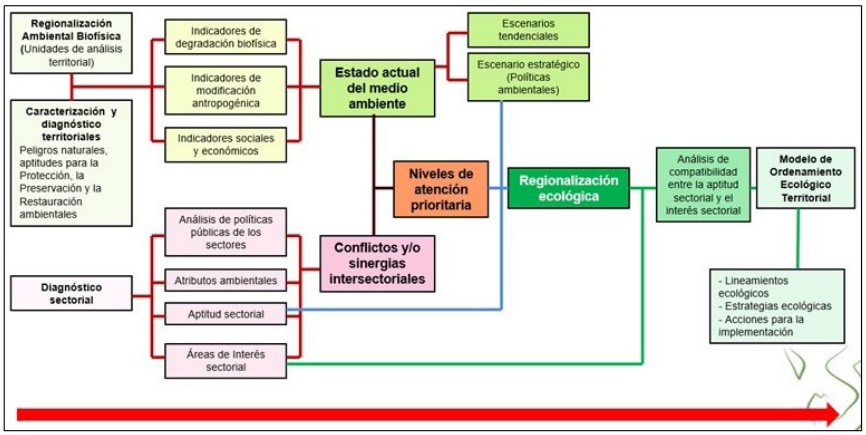
Figura 8. Categorías y subcategorías del relieve de la región noroccidental del estado de Chiapas



Categorías/ Subcategorías del relieve	Hipsometría (en m)	Disección vertical (en m)	Disección horizontal (en km/km²)
Montañas bajas	801-1260	401-700	3.0-5.0
Premontañas	301-800	201-400	2.0-3.0
Lomerios	201-300	101-200	1.5-3.0
Llanuras muy colinosas	61-200	51-100	2.0-3.0
Llanuras colinosas	41-60	31-50	2.0-3.0
Llanuras onduladas	21-40	21-30	2.0-3.0
Llanuras planas	20 ≤	20 ≤	0-0.5

Fuente: Hernández-Santana *et al.*, 2009c.

Figura 9. Enfoque conceptual geoecológico aplicado a la ordenación general del territorio mexicano



Fuente: Hernández Santana *et al.*, 2020.

Cuadro 2. Categorías y subcategorías del relieve: algunos criterios globales, continentales, regionales, insulares y locales

CATEGORÍAS Y SUBCATEGORÍAS DEL RELIEVE	MUNDIAL **(Bashenina, 1988)**	MUNDIAL **(Spiridonov, 1974)**	México (morfoestructuras) **(Nuevo Atlas Nacional de México, 2007) (Hernández-Santana, Lugo-Hubp, Ortiz-Pérez, 2007)**	REGIONAL CONTINENTAL: OAXACA **(Hernández-Santana *et al.*, 2009a)**	INSULAR: CUBA **(Portela-Peraza *et al.*, 1989)**	CUENCA PAPAGAYO-OMITLÁN, GRO **(Hernández-Santana *et al.*, 2005)**	NOROESTE DEL ESTADO DE CHIAPAS **(Hernández-Santana *et al.*, 2009b)**
Montañas muy altas	H > 5 000 m (8 848 m, Pico Everest)	3 000 < H≤ 5 000 m (Extremas H> 5000 m)		-----	-----	-----	-----
Montañas altas	2 500 < H≤ 5 000 m	2 000 < H≤ 3 000 m	H > 2 500 m	2 500 < H ≤ 3 750 m Pico Quiexobra, Sierra Miahuatlán	-----	-----	-----
Montañas medias	1 300 < H ≤ 2 500 m	1 000 < H≤ 2 000 m	1 300 < H ≤ 2 500 m	1 300 < H ≤ 2 500 m	1 200 < H ≤ 1 974 m Pico Turquino, Sierra Maestra	1200<H≤ 2260 m	-----
Montañas bajas	800 < H ≤ 1 300 m	500 < H ≤ 1 000 m	800 < H ≤ 1 300 m	800 < H ≤ 1 300 m	800 < H ≤ 1 200 m	800<H ≤1 200 m	801 < H ≤ 1 260 m Volcán El Chichón
Premontañas	600 < H ≤ 800 m	500 m ≤ H	400 < H ≤ 800 m	400 < H ≤ 800 m	Altas, 500< H ≤ 800 m Bajas, 300< H ≤500 m	400 < H ≤ 800 m	301 < H ≤ 800 m
Lomeríos	650 m < H	Altos, 400 < H ≤ 500 m Medios, 300 < H ≤ 400 m Bajos, 200 < H ≤ 300 m	Indiferenciados, 0 < h ≤ 400 m	200 < H ≤ 400 m	Altos, 200<H≤300 m Medios, 120< H≤ 200 m Bajos, 120 m < H	220 < H ≤ 400 m	201 < H ≤ 300 m
Llanuras	0 < H ≤ 250 m	Medias, 150 < H ≤ 200 m Bajas, 75 < H ≤ 150 m Muy bajas, 0 < H ≤ 75 m	Intermontanas 0 < h ≤ 300 m Costeras 0 < H ≤ 240 m	220 m < H	Muy altas y altas, 120 < H ≤ 280 m Medias, 20< H ≤120 m Bajas y muy bajas, 20 m< H	220 m < H	220 m < H

Fuente: elaboración propia.

4. Intensidad geomórfica: sus niveles de compatibilidad con el desarrollo agrícola

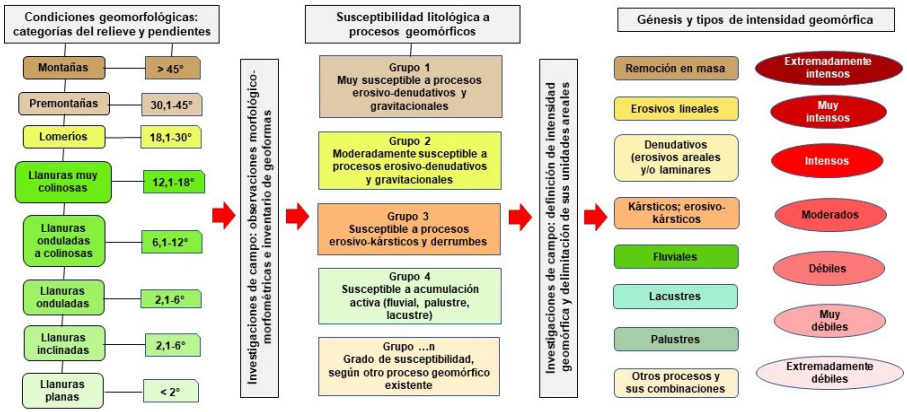
Para la toma de decisiones en la planeación territorial es de suma importancia el conocimiento de las condiciones y variables geográficas, tanto biofísicas y socioeconómicas como jurídicas que conforman el marco territorial. Esta necesidad es aún mayor para las actividades sectoriales que demandan vastos espacios como la agricultura, la ganadería, la silvicultura y el fomento forestal; entre las que poseen ese carácter más extensivo y, en ocasiones, intensivo.

Bajo el enfoque físico-geográfico este escenario exige investigaciones que revelen la aptitud natural de cada espacio, es decir, la vocación natural de éstos para cada tipo de actividad productiva. Por supuesto, la determinación de la aptitud natural o vocación natural debe evaluarse tomando en consideración los tipos de substrato geológico, el carácter del relieve, los regímenes climático e hidrológico, las cualidades físico-mecánicas y químicas de los suelos; la relevancia de la vegetación y el uso del suelo, entre los principales.

De acuerdo con la esencia geomorfológica de este capítulo, se aborda la estimación y el cálculo de los procesos geomórficos exógenos de su intensidad geomórfica, considerando las subcategorías del relieve (motor de su energía potencial, en función de la altura relativa), las pendientes (motor de su energía cinética) y el nivel de susceptibilidad del substrato geológico (carácter pasivo de la litología en el modelado y como catalizador potencial de la intensidad de un proceso específico). De esta forma, se clasifican los procesos imperantes en cada nivel de susceptibilidad, así como intensidades en función de la pendiente como el inventario en condiciones de campo y densidad de geoformas (Figura 10).

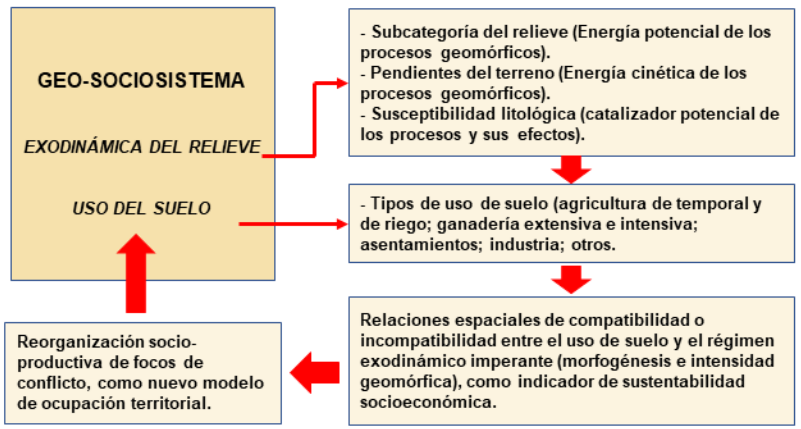
Partiendo del esquema geo-socio-sistema (pudiera llamarse como eco-social) (Figura 11) y tomando las características genéticas y de intensidad en los procesos, así como el uso agrícola del suelo y su extensión, se desprenden cuatro etapas específicas para este enfoque metodológico: (a) determinación de la génesis e intensidad de los procesos geomórficos exógenos, a partir del grado de susceptibilidad del substrato geológico a los mismos y las condiciones energéticas del relieve (subcategorías del relieve, y pendientes de laderas y superficies); (b) identificación del uso agrícola del suelo; (c) aplicación del índice de compatibilidad geomorfológica general (ICGG) y específica del uso agrícola del suelo (ICGE) para cada tipo de proceso geomórfico y su intensidad; y (d) reorganización espacial del modelo socio-productivo en las áreas detectadas como focos de conflicto. Por supuesto, esta identificación, clasificación y representación cartográfica de la intensidad geomórfica está encaminada a la detección de los grados de compatibilidad existente entre las áreas dedicadas a la agricultura (u otra actividad productiva) y la distribución de los procesos geomórficos, siendo compatibles o no con la actividad.

Figura 10. Flujograma ilustrativo del proceso de determinación de la intensidad geomórfica, a partir de la inclinación de las laderas y/o superficies, y del grado se susceptibilidad litológica



Fuente: elaboración propia.

Figura 11. Flujograma de la compatibilidad geomórfica del uso de suelo en el contexto de su reordenamiento sustentable permanente



Fuente: elaboración propia.

Desde el punto de vista metodológico, la visión geólogo-geomorfológica de esta problemática, se enfoca a la prevención, mitigación o corrección de los conflictos actuales y futuros del uso agrícola del suelo (u otra actividad

productiva) en condiciones desfavorables de la dinámica del relieve, por ello se proponen los siguientes objetivos:

a. Identificar las zonas donde la susceptibilidad litológica del substrato geológico de los procesos geomórficos exógenos y grado de inclinación del terreno como condicionante energética, puedan desarrollarse con diferentes grados de intensidad, los procesos de remoción en masa, los procesos erosivos y denudativos; los erosivo-kársticos y los acumulativos fluviales o lacustres, así como otros muchos y sus combinaciones.
b. Establecer una base orientativa sobre la dinámica de los procesos geomórficos exógenos que permita, sobre la base del uso actual del suelo, detectar cuáles de dichos usos por localidades podrían perturbar aún más las condiciones naturales, la degradación geomorfológica, el deterioro del fondo agrícola de los suelos y, por ende, la eficiencia sustentable de los rendimientos productivos.
c. Detectar las zonas críticas de incompatibilidad en el uso de suelo actual de plantaciones y cultivos agrícolas con la dinámica potencial del modelado geomorfológico.
d. Crear y proponer índices numéricos de compatibilidad específica (ICGE) y general (ICGG) del uso agrícola con la intensidad y el tipo genético del modelado de la superficie terrestre como nuevos indicadores dirigidos al desarrollo sustentable, sobre la base de la optimización del uso del suelo agrícola, en función de la exodinámica del relieve.

Desde el punto de vista metodológico para la elaboración del mapa de procesos geomórficos actuales, se desarrolla un modelo digital del terreno en un SIG creando mapa de pendientes con la mayor resolución posible de acuerdo con la escala de trabajo. Posteriormente, se procede al agrupamiento litológico por niveles de susceptibilidad a los procesos (grupos I,…,n) degradativos como agradativos, rasterizados a un tamaño de pixel acorde con la resolución. Para la representación cartográfica de los procesos geomórficos exógenos y sus intensidades geomórficas se realizan cálculos con algebra booleana, utilizando los mapas litológico-grupal y de pendientes rasterizados.

Los grupos diferenciados según la susceptibilidad litológica (I,…,n) puede clasificarse como más susceptibles que los procesos exógenos (por ejemplo, substrato extrusivo, metamórfico y sedimentario), moderadamente susceptibles (rocas extrusivas), susceptibles al desarrollo de procesos agradativos, de acumulación dinámica, pero de acumulación en estructuras deprimidas; otros de acuerdo con la composición litológica y sus características geotécnicas. Esta clasificación requiere trabajo de campo y referencias geotécnicas sobre la resistividad y resistencia mecánica de estas rocas.

Una vez realizados los agrupamientos de susceptibilidad al modelado por la resistencia del substrato, se establecen las matrices con los intervalos de pendientes tomando en consideración los resultados observados campo como el inventario de formas del relieve, logrando identificar los diferentes tipos genéticos de procesos, sus intensidades y su representación cartográfica. Aplicaciones de esta naturaleza pueden consultarse en Hernández-Santana *et al.* (2009d, 2010).

Para determinar el índice de compatibilidad geomórfica específica, se cuantifica el área que ocupa un proceso específico correlacionando con el área de cobertura agrícola. De esta manera, la valoración y el cálculo de cada uno de los vínculos superficiales entre cada tipo específico de proceso geomórfico exógeno y el uso agrícola actual de suelo permite determinar el valor específico superficial del conflicto para cada correlación. De ahí su cálculo para establecerse por la siguiente fórmula:

$$\text{ICGE (Índice de compatibilidad geomórfica específica)} = Ac/Act, \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Ac representa el área actual de cultivos bajo la acción de un tipo específico de proceso geomórfico y Act, el área actual total de uso agrícola de suelo en todo el territorio estudiado.

Este indicador, al igual que el índice de compatibilidad geomórfica general (ICGG), alcanza valores ≤ 1 que multiplicado por 100 genera un valor porcentual.

El índice de compatibilidad geomórfica general (ICGG) del uso agrícola de suelo es igual a la sumatoria de las áreas de conflictos con procesos específicos de cada grupo de compatibilidad, entre el área total de cultivos (Act) del territorio estudiado, es decir:

$$\text{Grupo de Incompatibilidad} = \sum {}^{n}i = 1 \; Apgei/Act \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde Apgei es el área de los procesos geomórficos específicos, incompatibles con la actividad agrícola. Entiéndase, a manera de ejemplo, procesos de remoción en masa, erosivos y fluviales erosivos de cauce extremadamente intensos, muy intensos, intensos y moderados.

$$\text{Grupo de Compatibilidad} = \sum^{n}i = 1 \; Apgec/Act \qquad \text{Ecuación 3}$$

Donde Apgec es el área de los procesos geomórficos específicos, compatibles con la actividad agrícola, por ejemplo procesos denudativos (laminares)

moderados, débiles y muy débiles; fluviales acumulativos de cauce intensos y muy intensos; lacustres y biogénicos acumulativos muy intensos.

$$\text{Grupo moderadamente compatible} = \sum ni = 1 \; Apgemc/Act \qquad \text{Ecuación 4}$$

Donde Apgemc es el área de los procesos geomórficos específicos, moderadamente compatibles con la actividad agrícola. Entre ellos se pueden mencionar los procesos erosivos moderados y débiles; denudativos laminares intensos y moderados, así como procesos fluviales erosivos de cauce moderados y acumulativos débiles; entre otros. Para un análisis integral y diferenciado en la compatibilidad geomórfica de la actividad agrícola u otro desempeño productivo, se puede establecer un cuadro resumen (como el ilustrado en el Cuadro 3).

La definición y la metodología de cálculo, así como la expresión cartográfica de los índices de compatibilidad geomórfica específica y general del uso agrícola del suelo constituyen una nueva contribución para el establecimiento de índices de sustentabilidad territorial. Estos índices cumplen los requisitos técnicos que deben satisfacer los indicadores para el análisis territorial, formulados por Palacio *et al*. (2004), "pueden ser representados cartográficamente, se basan en metodologías sencillas, para su obtención, existen fuentes de datos accesibles y confiables que pueden actualizarse periódicamente con fines de monitoreo, permiten establecer tendencias". Para el cálculo y aplicación de la relación entre la pendiente general del terreno y el uso de suelo, existen diferentes sistemas de clasificación que resultan importantes de acuerdo con el criterio que regule un estudio; ejemplo de ello es la clasificación de la pendiente en zonas agrícolas para la caracterización de la capacidad agrícola de suelos de España; los discernimientos de selección de rangos de pendiente para distintas instalaciones y actividades urbanas de la State Geological Survey of Kansas y el sistema de la Soil Survey Staff para zonas agrícolas, entre otros.

Este tipo de aplicaciones en la geomorfología ambiental permite conocer la distribución espacial de los niveles de compatibilidad entre las condiciones geomorfométricas del relieve, la respuesta litológica frente al modelado exógeno y la extensión de la actividad agrícola; su localización en el territorio como superficie por tipo de compatibilidad y porcentaje respecto al total de la superficie cultivada. Indiscutiblemente, esta información es de gran utilidad para la administración gubernamental estatal y de fomento futuro a la agricultura, tanto para planeadores, directores de granjas o cooperativas campesinas, comunidades ejidales, autoridades gubernamentales municipales, como para otros actores sociales involucrados en la sustentabilidad de este sector de su economía en un contexto territorial determinado.

Cuadro 3. Valores de compatibilidad general del uso agrícola de suelo con la intensidad potencial de los procesos geomórficos exógenos (intensidad geomórfica), atendiendo al agrupamiento de los procesos compatibles, moderadamente compatibles e incompatibles con la agricultura.

Grados de compatibilidad entre procesos geomórficos y el uso de suelo agrícola	Compatibles	Moderadamente compatibles	Incompatibles
Tipo de proceso geomórfico y su intensidad potencial, según su grado de compatibilidad agrícola	Números de identificación de los procesos geomórficos	Números de identificación de los procesos geomórficos	Números de identificación de los procesos geomórficos
Área total de desarrollo de los tipos de procesos geomórficos (en km^2), según su grado de compatibilidad agrícola	Valor total de áreas de procesos compatibles	Valor total de áreas de procesos moderadamente compatibles	Valor total de áreas de procesos incompatibles
Área total del territorio estudiado (en km^2)	Valor del área total		
Área total de uso agrícola de suelo (en km^2)	Valor del área cultivada total		
Áreas de cultivos (en km^2) y su vínculo con los procesos geomórficos	Área cultivada en zonas de procesos geomórficos compatibles	Área cultivada en zonas de procesos geomórficos moderadamente compatibles	Área cultivada en zonas de procesos geomórficos incompatibles
Valor del índice de compatibilidad geomórfica general (ICGG) por grupos	Valor numérico ≤ 1	Valor numérico ≤ 1	Valor numérico ≤ 1
Porcentaje superficial del grado de conflicto	% compatible	% moderadamente compatible	% incompatible
Medidas correctivas y de control	No se requieren	Aplicar medidas agrotécnicas especiales y antierosivas	Cambiar el uso de suelo agrícola a uso forestal o de conservación

Fuente: elaboración propia.

Conclusion

El enfoque aplicado a la ciencia geomorfológica en el contexto de la geografía constructiva presenta múltiples direcciones de carácter cuantitativo y cualitativo, analítico y sintético, multivariable e integrado, estratégico y operacional que garantizan no solo la caracterización espacial y diagnóstico de las condiciones morfológico-morfométricas, genético-estructurales y geodinámicas del relieve; sino que ofrecen una valoración más robusta para el manejo de las cuencas hidrográficas, la planeación territorial, la optimización de las acciones antrópicas, que trazan y diseñan obras con infraestructura en general para la gestión de riesgo en este enfoque pragmático del relieve.

La geometría y la estructura del relieve de un territorio constituyen, en gran medida, las condiciones para el desarrollo energético de los diferentes procesos de modelado exterior; algunos con gradientes dinámicos de corta duración, que derivan en grandes desastres, sobre todo en zonas de elevada vulnerabilidad física y construida. Frente a estas posibilidades y probabilidades, el enfoque, los métodos y las herramientas geomorfológicas soportados en aplicaciones geotecnológicas, son un excelente aliado para la gestión de riesgo en regiones con presencia de amenazas naturales o en espacios urbanos altamente deformados y alterados por la actividad humana.

La geomorfología ambiental es la subdisciplina del estudio del relieve más próxima a la visión holística del medio ambiente en su amplia composición e interacción; es por ello, que ocupa un lugar dentro del enfoque de la geografía constructiva. A su vez, sobre esta subdisciplina geomorfológica descansa una amplia gama de aplicaciones dirigidas a la optimización productiva del uso territorial. Por ello, la gestión ambiental de áreas con fragilidad natural y prevención de riesgos por procesos geográficos adversos, se debe considerar la necesidad de varias lecturas de sus resultados (académicas con fines de desarrollo científico) y las dirigidas a autoridades, profesionistas, sociedades civiles y público general, para trazar las políticas y las medidas pertinentes.

Uno de los problemas contemporáneos del desarrollo científico y sus aplicaciones en los países con destinos nacionales se rigen por decisiones autocráticas que no toman en consideración criterios académicos y tecnológicos, son de baja eficiencia y eficacia en el cumplimiento del ciclo de la ciencia pues el presupuesto dedicado a la actividad debe revertirse en el progreso teórico y aplicado con su implementación, extensión y comercialización; este último como refinanciamiento al sector académico. En la complejidad del mundo de hoy, si las decisiones político-gubernamentales aspiran al éxito, deben asimilar las contribuciones científicas y tecnológicas, de lo contrario los desaciertos y nuevos problemas agudizarán más los endebles equilibrios medioambientales y socioeconómicos globales y locales.

Bibliografía

Anochko, V. S. (2011). *Geografía Aplicada*. Minks, 282 pp. http://elib.bsu.by/bitstream/123456789/20344/1/прикладная%20география.pdf. (en ruso).

Arias González, D. L. (2017). Mapa geomorfológico del municipio de Banes, a escala 1:100 000. *Ciencia y Futuro, 7*(1),1-19.

Averkieva K. V., Glezer O. B., Tishkov A. A. (2016). Constructive Geography: 30 years without academician of Russian Academy of Sciences I. P. Gerasimov. Izvestiya Rossiiskoi Akademii Nauk. *Seriya Geograficheskaya, 1*,160-165. DOI:10.15356/0373-2444-2016-1-160-165. (en ruso).

Barragán, J. M. (2003). *Medio ambiente y desarrollo en áreas litorales. Introducción a la planificación y gestión integradas*. Servicio de publicaciones Universidad de Cádiz, 306 pp.

Bashenina, N. B. (1988). *Geomorfologuicheskaia Karta Mira, m-ba 1: 15 000 000*. Moscú: Izdatelstba Gozudarstbennii Uprablienia Geodezii y Kartografii, 1 hoja (en ruso).

Bollo-Manent, M. y Hernández-Santana, J. R. (2008). Paisajes físico-geográficos del noroeste del estado de Chiapas, México. *Investigaciones Geográficas, 66*, 7-24. DOI: 10.14350/rig.17979.

Bollo-Manent, M., Hernández-Santana, J. R., Méndez-Linares, A. P. (2010). Evaluación de potenciales naturales en el ordenamiento ecológico territorial: noroeste del estado de Chiapas, México. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 53*,191-218.

Bollo-Manent, M., Hernández Santana, J. R., Méndez Linares A. P. (2014). The state of the environment in Mexico. *Central European Journal of Geosciences, 6*(2), 219-228. DOI: 10.2478/s13533-012-0172-1.

George, P., Guglielmo, R., Kayser, B., Lacoste, I. (1966). *La Geografía Activa*. Ariel, 394 pp.

George, P. (1980). Geografía activa. Ariel, 414 pp.

Grigorieb, A. A. (1944). *Mapa geomorfológico de la República Soviética de Kazakhstan*. Astaná, URSS.

Guerasimov I. P. (1963). Un libro sobre los orígenes y un artículo sobre las perspectivas de la geografía constructiva en nuestro país. *Geograficheskogo obschestva SSSR. T. 95*(6), 552-555. (en ruso).

Guerasimov, I. P. (1966). Geografía Constructiva. Objetivos, métodos y resultados. Moscú. *Izvestia Geograficheskogo obschestva SSSR, 98*(5), 389-403 (en ruso).

Guerasimov, I. P. (1976). *Geografía constructiva soviética*. Tareas, enfoques y resultados. Nauka, 207 pp. (en ruso).

Hernández Santana, J. R., Ortiz Pérez, M. A. (2005). Análisis morfoestructural de las

cuencas hidrográficas de los ríos Sabana y Papagayo (tercio medio-inferior). *Investigaciones Geográficas, 56*, 7-25. DOI: 10.14350/rig.30093.

Hernández-Santana, J. R., Lugo-Hubp, J. I., Ortiz-Pérez, M. A. (2007). Morfoestructuras. En Atlántida Coll Hurtado (Coord.) *Nuevo Atlas Nacional de México*, p. NA.III.1.

Hernández Santana, J. R., M. A. Ortiz Pérez, M., Figueroa Mah-Eng (2009a). Análisis morfoestructural del Estado de Oaxaca, México: un enfoque de clasificación tipológica del relieve. *Investigaciones Geográficas, 68*, 7-24. DOI: 10.14350/rig.17995

Hernández Santana, J. R., M., Bollo Manent, A. P., Méndez Linares, M., Figueroa Mah-Eng (2009b). Formación y morfogénesis del relieve del extremo noroccidental del Estado de Chiapas, México. *Investigaciones Geográficas, 68*, 25-40. DOI: 10.14350/rig.17996

Hernández-Santana, J. R., Bollo Manent, M., Méndez Linares, A. P., Figueroa Mah-Eng M. (2009c). Formación y morfogénesis del relieve del extremo noroccidental del Estado de Chiapas, México. I*nvestigaciones Geográficas, 68*, 25-40. DOI: 10.14350/rig.17996

Hernández-Santana, J. R., Miguel-López, C., Méndez-Linares, A. P., Bollo- Manent, M., Ricardez-Cabrera, M. M. (2009d). Geomorphic compatibility of the agricultural land use on the higher basin of Lerma River, Mexico. *Journal of Maps,* v. 2009:253-262. DOI: 10.4113/jom.2009.1015

Hernández Santana, J. R., López Miguel, C., Méndez Linares, A. P., Bollo Manent, M. (2010). Intensidad geomórfica del relieve noroeste del estado de Chiapas: un enfoque para la planeación territorial. *Cuaternario y Geomorfología, 24*(1-2), 79-98.

Hernández-Santana, J. R., Bollo-Manent, M., Méndez-Linares, A. P. (2013a). Ordenamiento ecológico general del territorio mexicano: enfoque metodológico y principales experiencias. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, 63*, 33-55. Extended Summary General Ecological Planning of MexicanTerritory: Methodological Approach and Main Experiences, 63, 427-432. DOI:10.21138/bage.1605

Hernández Santana, J. R., M., Bollo Manent, A. P., Méndez Linares, C., López Miguel, (2013b). Programa de Ordenamiento Ecológico General del Territorio (POEGT) de México: una primera aproximación en el sexenio 2006-2012, pp. 343-379. En Sánchez Salazar, M. T., G. Bocco Verdinelli y J. M. Casado Izquierdo (coords.) *La Política de Ordenamiento Territorial en México: de la Teoría a la Práctica*, Ed. INECC, México, D. F.

Hernández Santana, J. R., M., Bollo Manent, A. P., Méndez Linares (2016). Premisas geográficas de la organización ecólogo-productiva del territorio nacional. En Moncada Maya O. (ed.), Geografía de México. *Una reflexión espacial contemporánea*, Instituto de Geografía-UNAM y Programa Editorial del Gobierno de la República-SEP, México, D. F., pp. 278-293.

Hernández-Santana, J. R., J. L., Pérez-Damián, F., Rosete-Vérges, M., Villalobos-Delgado, A. P., Méndez-Linares, E., Navarro-Salas (2017). Clasificación geomorfométrica del relieve mexicano: una aproximación morfográfica por densidad de

curvas de nivel y la energía del relieve. *Investigaciones Geográficas, 94*, 1-15. DOI:10.14350/rig.57019

Hernández-Santana, J. R., Bollo-Manent, M., Méndez-Linares, A. P., Ongay-Dellhumeau, E., Zorrilla-Ramos, M., Ordaz-Hernández, A. (2020). Aptitud sectorial para el desarrollo forestal: consideraciones en la ordenación general del territorio mexicano. *Cuadernos Geográficos, 59*(1), 32-53. DOI: /10.30827/cuadgeo.v59i1.8079

Kuyler (1978, en Seco-Hernández, 1998). *Estudio del relieve para la actividad constructiva en territorios seleccionados del occidente de Cuba*. Tesis doctoral. Facultad de Geografía, Universidad de La Habana.100 pp.

Labasse, J. (1973). *La organización del espacio: elementos de geografía aplicada*. Instituto de Estudios de Administración Local, 752 pp.

Lacoste, Y. (1977). *La geografía un arma para la guerra*. Ed. Anagrama, 156 pp.

Lamadrid, J. y Horta, R. (1979). *Geomorfología*. Pueblo y Educación, 166 pp.

Levi Levi, S. (1970). Concepto de Geografía Aplicada. *Investigaciones Geográficas, 3*,200-201.

López Blanco, J. (2007). Mapa de regiones ambientales biofísicas de México, a escala 1:4 000 000. En: A. Coll-Hurtado (Coord.) *Nuevo Atlas Nacional de México*, Instituto de Geografía, UNAM, México, D. F., NA XV.1.

Mateo Rodríguez, J., V. da Silva y A. P. Brito Cavalgante (1994). Analise da paisage como base para estrategio de Organizacao Geoambiental. *Corumbatai cspl Colectario 004 Planeamiento Ambiental*. São Paulo: Universidad de São Paulo, pp. 57-105.

Ministerio de Alimentación, Agricultura y Medio ambiente (2014). *Guía para la elaboración de estudios del medio físico*. Fundación Conde del Valle de Salazar (ed.), 904 pp.

Navarro Sánchez, G. (2019). Zonificación ecológica: Unidades Ambientales Integradas (UAIs) como herramienta base de diagnóstico y gestión. *Acta Nova, 9*(3), 417-428.

Olcina Cantos, J. (2009). Ordenación del territorio y desarrollo local: conceptos y experiencias. En Joan Noguera Tur, María Dolores Pitarch Garrido, Javier Esparcia Pérez (eds.) *Gestión y promoción del desarrollo local*. Universidad de Valencia, pp. 9-35.

Orbera, L., Cabrera, M-, Fernández, C. (1977). Métodos morfométricos para la búsqueda de nuevas estructuras. *Revista la Minería en Cuba, 3*(3),15-23.

Ospino-Sepúlveda, L. J. y López-Rodríguez, A. C. (2019). Definition of Environmental Units of Analysis: alternative method as a basis for environmental zoning of marine-coastal ecosystems. *Bulletin of Marine and Coastal Research, 48*(1),103-117. DOI: 10.25268/bimc.invemar.2019.48.1.760

Palacio-Prieto, J. L., Sánchez-Salazar, M. T., Casado-Izquierdo, J. M., Propin Frejomil,

E., Delgado Campos, J., Velázquez Montes, A., Chías Becerril, L., Ortiz Álvarez, M. I., González Sánchez, J., Negrete Fernández, G., Gabriel Morales, J., Márquez Huitzil, R., Nieda Manzano, T., Jiménez Rosenberg, R., Muñoz López, E., Ocaña Nava, D., Juárez Aguirre, E., Anzaldo Gómez, C., Hernández Esquivel, J. C., Valderrama Campos, K., Rodríguez Carranza, J., Campos Campuzano, J. M., Llamas Cruz, H. V., Camacho Ramírez, C. G. (2004). *Indicadores para la caracterización del territorio y el ordenamiento territorial*. UNAM y SEDESOL, 161 pp.

Pérez-Damián, J. L., Hernández-Santana, J. R., Rosete-Vérges, F., Villalobos- Delgado, M., Méndez-Linares A. P., Navarro-Salas, E. (2011). *Unidades morfométricas del relieve mexicano*. INE-SEMARNAT, Instituto de Geografía-UNAM, México, D. F., 122 hojas a escala 1:250 000.

Pérez-Peña, M. V., Cruz-Toledo, R., Prol-Betancourt, J. L., Jiménez de la Fuente, L. (2016). Integración del análisis geomorfológico con métodos geofísicos para la exploración de hidrocarburos en el sector Majaguillar-Corralillo, *Cuba. Minería y Geología, 32*(3),16.31

Phlipponneau, M. (1960). *Geographie et action. Introduction à la géographie appliquée*. Colin, 227 pp.

Portela-Peraza, A. H., Díaz Díaz, J. L., Hernández-Santana, J. R., Magaz García, A. R., Blanco Segundo, P. (1989). Geomorfología. En *Instituto Geográfico Nacional de España Nuevo Atlas Nacional de Cuba*. Madrid.

Ramírez-Suárez, R. (2003). Reseña de Geografía Aplicada de Michel Phlipponneau. *Territorios, 9*, 96-97.

Rosabal Domínguez, S., Rodríguez-Infante, A., Zapata-Balanqué, J. A. (2016). Esquematización morfotectónica del sector Guamá, Santiago de Cuba. *Minería y Geología, 32*(3), 32-46.

Sagripanti, G., Origlia, D. O., Orbera-Hernández, L. (1998). Aplicación de métodos morfométricos como apoyo a estudios geotectónicos. *Minería y Geología, 15*(3), 87-96.

Sánchez-Salazar, M. T., Martínez, R., Suárez-Lastra, M., Oropeza-Orozco, O., Chías-Becerril, L., Hernández-Santana, J. R., Juárez-Gutiérrez, M. del C., Ortiz-Álvarez, M. I., Propin-Frejomil, E., Quintero-Pérez, J. A., Aguirre-Gómez, R., Reséndiz-López, H., Gómez-Rodríguez, G. (inédito). *Guía para la Licenciatura en Geografía Aplicada. Instituto de Geografía*, UNAM, Tomo I, 73 pp.

Seco Hernández, R. (1998). *Estudio del relieve para la actividad constructiva en territorios seleccionados del occidente de Cuba*. Tesis de doctorado. Facultad de Geografía. Universidad de La Habana, 100 pp.

SEMARNAT (2013). *Cuencas hidrográficas. Fundamentos y perspectivas para su manejo y gestión*. SEMARNAT. 31 pp.

Spiridonov, A. I. (1974). *Cartografía geomorfológica*. Nedra, 182 pp. (en ruso).

Stamp, D. L. (1960). *Applied Geography*. Londres: Penguin Book.

Steel, R. W. (1961). Applied Geography. *Nature*, 192, 715-717. DOI: 10.1038/192715a0

Strahler, A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Society of America Bulletin, 63*, 1117-1142.

Tricart, J. y J. Kilian (1982). *La eco-geografía y la ordenación del medio natural*. Ed. Anagrama, 288 pp.

Verstappen, H. Th., Van Zuidam, R. A. (1991). The ITC system of geomorphology survey: a basis for the evaluation of natural resources and hazards. *Netherlands, ITC Publication*, 10, 89 p.

Vilá, J. (1968). Algunos puntos de vista acerca de la geografía aplicada. *Revista de Geografía, 2*, 43-56.

Viles, H. (2008). Biogeomorfologia: de Darwin al futur. *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears, 51*, 9-15.

Winchester, V. (2004). *Dendrogeomorfphology*. In A. S. Goudie (ed.) Encyclopedia of Geomorfphology. USA: Routledge, t. I, pp. 239-240.

Capítulo 4. Análisis geomorfológico integral del relieve moderno: una aproximación metodológica para la planeación territorial en cuencas costeras

José Ramón Hernández Santana [1]
Ana Patricia Méndez Linares [2]
Manuel Bollo Manent [3]

Introducción

En los años noventa del siglo XX, paralelamente al Programa de la Década Internacional para la Reducción de Desastres, se desarrolló el Programa Internacional Geosfera-Biosfera (IGBP) enfocado a varios objetivos: a la creación e interpretación de modelos geográficos interactivos de factores, motores de cambios globales y evolución del medio ambiente planetario en contextos regionales.

Uno de los aspectos preocupantes estaba centrado en el ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las zonas costeras, tomando en consideración los componentes geográficos del sistema terrestre y los vínculos entre sus distintos dominios. No obstante, la revisión de estos modelos detectó que la mayoría no contempló los cambios de la superficie terrestre ante las deformaciones tectónicas (de emergencia o de subsidencia); muchas variables se

1 Doctor en Ciencias Geográficas. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

2 Maestra en Ciencias Biológicas. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México.

3 Doctor en Ciencias Geográficas. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México.

analizaban con una visión dinámica, pero otras permanecían estáticas o no eran consideradas como el caso de la dinámica de la corteza terrestre y la sedimentogénesis costera. Este detalle estimuló a la formulación de escenarios que incorporaban el dominio litosférico y sus tendencias tectónicas, sobre todo el auge geocientífico de aquel entonces en el cálculo y representación cartográfica de los movimientos tectónicos recientes (mediciones geodésicas reiteradas). Hoy estas investigaciones se apoyan en nuevas tecnologías, por ejemplo la interferometría diferencial (DInSAR) y el empleo de imágenes radar de apertura sintética (SAR) (Bewley *et al*., 2006; Mazzotti *et al*., 2009; Garatachia-Ramírez, 2017; Bott *et al*., 2021; Hairuo Yu *et al*., 2022; Orellana *et al*., 2022; Wu *et al*., 2022), y receptores GPS de muy alta velocidad y precisión (Ebinuma y Kato, 2012).

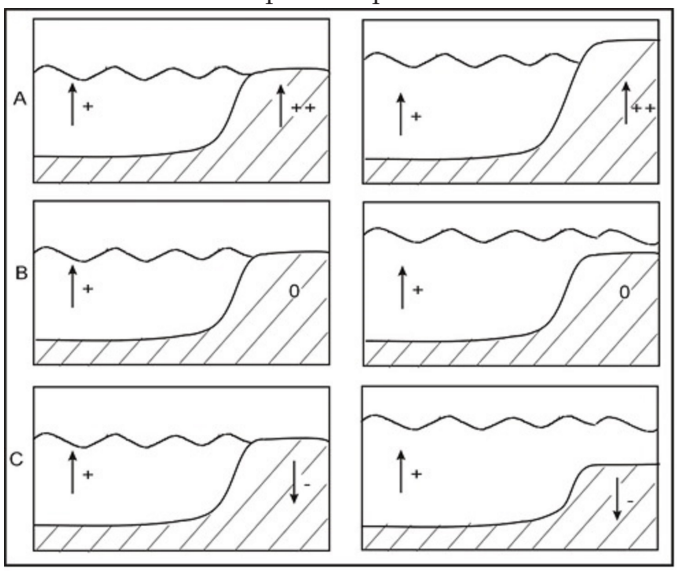
Dentro de las direcciones académicas de aquellos programas destacan los aspectos de cambio climático y sus consecuencias en las zonas costeras, debido al ascenso medio del nivel del mar por el aumento de la temperatura global y consecuente deshielo ártico, antártico, así como glacial en las regiones montañosas. Predicciones del Panel Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) sugieren un aumento de +0.26 a +0.77 m para el año 2100 con respecto a 1986-2005; si el calentamiento global es de +1.5° (IPCC, 2019) las que coinciden con las estimaciones anteriores de +0.18 a +0.59 m (IPCC, 2007) y los cálculos de Warrick *et al.* (1996) de +0.49 m. De esta manera se aprecia la tendencia del ascenso marino en aumento en las últimas décadas. Indiscutiblemente estos escenarios reconfigurarán la costa moderna y establecen irreversibles cambios geográficos, ecológicos y socioeconómicos en sus entornos. Las zonas costeras, sobre todo las más bajas, comienzan un proceso paulatino de "oceanización" que culmina con un cambio brusco de procesos geomórficos en condiciones de costa emergida hacia procesos de modelación y transporte marinos, así como la destrucción de ecosistemas e infraestructuras antrópicas.

Paralelamente a esta amenaza glacioeustática, otro de los procesos agravantes es la subsidencia de las regiones costeras (génesis fluvial y lacunopalustre) por la compactación de la cobertura sedimentaria (Hu *et al*., 1994; Changxing *et al*., 2007), los cambios de acuíferos por sobreexplotación creciente (Meckel *et al*., 2006; Mazzotti *et al*., 2009; Ingebritse *et al*., 2014; Brain, M. J., 2016; Minderhoud *et al*., 2020; Hairuo Yu *et al*., 2022; Galloway *et al*., s.f.); deshidratación y pérdida volumétrica de las arcillas (Liu *et al*., 2001), extracción excesiva de hidrocarburos en general (Olson *et al*., 2021) por las marejadas fuertes en tiempos de tormentas ciclónicas (Palacio *et al*., 1999; Lugo e Inbar, 2002; Sheffers *et al*., 2006; Luber *et al*., 2015; Coch, 2020) y los desplazamientos producidos en el ciclo sísmico (Orellana *et al*., 2022).

La suma de estos procesos y otros de carácter antrópico, genera diversos escenarios adversos en los sectores más bajos de las cuencas fluviales de la

costa que se deben considerar (planeadores territoriales y urbanos) con la finalidad de identificar micro-localizaciones de infraestructuras, de actividades productivas como de asentamientos humanos que no favorecen o incrementan los impactos de penetración marina como de inundaciones fluviales costeras. De acuerdo con Hernández-Santana *et al.* (1999), en la figura 1 se muestran tres escenarios interactivos del ascenso a nivel medio del mar y las zonas costeras bajo subsidencia sostenida de la corteza terrestre o por compactación sedimentaria. El escenario A corresponde a cuencas costeras notablemente emergentes ante el ascenso del nivel medio del mar; el resultado sería el modelado de la costa con acantilados abrasivos y ausencia de penetración marina. El escenario B muestra el caso de costas con estabilidad tectónica y sin subsidencia debida a otros factores, donde ascender el nivel del mar, provocaría determinada afectación por penetración marina y, finalmente, el caso C (el más preocupante) donde las tendencias de la subsidencia y del ascenso marino serán inversamente proporcionales, ocasionando las penetraciones marinas e inundaciones terrestres más intensas.

Figura 1. Escenarios de vulnerabilidad en cuencas costeras ante el ascenso del nivel medio del mar, según la estabilidad tectónica regional o local: A. Zonas costeras emergentes, B. Zonas costeras con relativa estabilidad tectónica y C. Zonas costeras con subsidencia sostenida. A la izquierda, se encuentra la situación actual y a la derecha los escenarios de vulnerabilidad e impactos esperados



Fuente: Hernández-Santana (1999).

Estudios realizados por Wu *et al*. (2022) en varias decenas de ciudades del mundo, arrojaron que "parte de la tierra se está hundiendo más rápido de lo que sube el nivel del mar" y "si el hundimiento continúa al ritmo actual, estas ciudades serán desafiadas por las inundaciones mucho antes de lo proyectado por los modelos de aumento del nivel del mar" con lo cual coinciden Mazzotti *et al*. (2009). Este panorama se asocia al escenario C de la figura 1, muy común en regiones deltaicas; México evalúa el frente deltaico costero del estado de Tabasco, ya que se reporta retrocesos alarmantes en la costa de algunos sitios como en el poblado Sánchez Magallanes con retrocesos máximos de -10 a -20 m/año, entre los años 1995 y 2003 (Hernández-Santana *et al*., 2008), originando serios daños en la infraestructura del poblado, con más de 500 casas destruidas en unos 60 años (Reportaje de la periodista Ana María Islas, comunicación personal, 26 de febrero de 2022, Figura 2). También el frente deltaico del río San Pedro, Campeche, con valores de -15 y -20 m de retroceso costero entre 1943 y 1972 (Ortiz-Pérez, 1992).

Figura 2. Daños a la infraestructura habitacional del poblado Sánchez Magallanes, Tabasco, ocasionados por el oleaje



Fuente: fotografía cortesía de Ana María Islas, 3 de febrero de 2022.

Desde el punto de vista geodinámico, las cuencas costeras abren la posibilidad de estudiar la subsidencia en general y la generada por las tendencias de los movimientos tectónicos recientes en sus dos aristas: 1) absolutos enlazados a las variaciones mareográficas y 2) relativos, con respecto al signo geodé-

sico que comprueba la estabilidad constructiva que se establece como punto "cero relativo". Conociendo las tendencias de cambio del nivel medio del mar y calculando los ascensos y descensos tectónicos por geodesia comparativa o interferometría de radar, se presentan los escenarios interactivos que conducen a altos niveles de vulnerabilidad y riesgos territoriales, tanto naturales como socioeconómicos - jurídicos (Figura 1). Estos últimos establecidos por los cambios dinámicos en el límite de la zona marítimo-terrestre que genera ambas fuerzas motrices: nivel de mar cambiante y una superficie terrestre costera emergente o subsidente con diferentes expresiones cinemáticas, que determinan desplazamientos de tierra dentro o fuera de dicha zona legalmente establecida. Es decir, un problema no abordado en México que requiere de un análisis de potencial, modificación o adecuación legislativa evitando múltiples querellas entre los afectados y las secretarías de estado involucradas.

De acuerdo con la *Ley General de Bienes Nacionales de los Estados Unidos Mexicanos*, publicada el 20 de mayo de 2004, título cuarto "De la Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al mar", numeral I establece que "cuando la costa presente playas, la zona federal marítimo terrestre estará constituida por la faja de veinte metros de ancho de tierra firme, transitable y contigua a dichas playas o, en su caso, a las riberas de los ríos, desde la desembocadura de éstos en el mar hasta cien metros río arriba" (Presidencia de la República, 2018). La encrucijada radica en escenarios de costas acumulativas de playa u otras de tipo sedimentario, sujetas a cambios morfodinámicos extremos y acelerados de retroceso costero, modificando el catastro jurídico establecido en la zona marítimo terrestre, tanto tenencias públicas de la tierra, como amenaza o afectación a las propiedades privadas.

Como dato hecho similar sucede en conflictos político-administrativos internacionales e incluso nacionales; sus límites están trazados por arterias fluviales en constante desplazamiento y cambio ejemplo de ello es el curso inferior del Río San Juan (provocando disputas territoriales entre Costa Rica y Nicaragua durante más de dos siglos). En "el último decenio con la promesa de construcción del Gran Canal Interoceánico de Nicaragua" y "la preocupación costarricense en torno a mantener la libre navegación por el río y preservar algunas áreas catalogadas como de fragilidad ambiental, es el caso de los humedales existentes en la cuenca del río San Juan y de algunos corredores biológicos que se vieron afectados por la construcción de un canal interoceánico" (Estacio-Ferro, 2018) incrementaron las tensiones en lo político y diplomático; actualmente latente.

Un caso argentino, Mantecón *et al*. (2017) indica que la erosión costera y su retroceso "llevan a conflictos con los ciudadanos que han adquirido lotes y viviendas en zonas que han desaparecido por erosión o se encuentran con probabilidades de desaparecer" como analizar el caso de Santa Clara del Mar en la provincia de Buenos Aires; las obras de "soluciones duras" como esco-

lleras o espigones han provocado ruptura en el equilibrio de la distribución sedimentaria a lo largo de la costa, ocacionando pérdidas de volumen que atentan contra las propiedades habitacionales.

Durante las investigaciones geomorfológicas del proyecto en la hidroeléctrica "La Parota" financiado por la Comisión Federal de Electricidad en los primeros años de este siglo, uno de los aspectos que necesita pruebas documentales de su estado de perfil de playa y estructura como zonas aledañas o edificaciones ante futuras reclamaciones de los propietarios por un potencial retroceso costero, derivado del déficit sedimentario del Río Papagayo (después del cierre del embalse). Indiscutiblemente, estas obras rompen el equilibrio en el transporte sedimentario de las cuencas fluviales a la costa y la ulterior distribución a lo largo de su configuración.

Por ello siempre se deben establecer líneas base de carácter ambiental o de algunos de los componentes geográficos para comparar y calcular los cambios generados durante la ejecución de los proyectos constructivos; siempre con miras a evaluar justa y económicamente los tipos de impactos y los costos de indemnización por los ejecutores de los proyectos. Con este fin, se trabaja con material fotográfico o fílmico mostrando el estado del perfil y de la costa (antes y después de la obra) amparados con documentación de carácter jurídico para enfrentar cualquier demanda ciudadana, empresarial o gubernamental.

Estas situaciones también evidencian el carácter dinámico de las zonas de borde o frontera entre dominios naturales, naturales-antrópicos, antrópicos, político-administrativos; los más frecuentes son el caso costero, las variaciones en la configuración del litoral que acarrean daños potenciales a la población asentada en la zona aledaña, así como la infraestructura económica, la salud y estabilidad de los ecosistemas costeros, sobre todo los humedales más frágiles. Por supuesto, la planeación y el manejo integrado de la zona costera dependen de un profundo conocimiento de las condiciones naturales, la magnitud, de la cinemática y la tendencia de los procesos físico-geográficos que rigen su desarrollo; de características de los diferentes usos de suelo, sus perspectivas de expansión y su ubicación cercana o no al litoral; los valores de la diversidad biológica sus ecosistemas y el nivel de vulnerabilidad de los mismos ante la ocurrencia y/o recurrencia de fenómenos naturales extremos y adversos; del grado de vocación natural o aptitud del territorio para satisfacer de manera eficiente y sostenible, las demandas productivas de los sectores económicos involucrados; los justos intereses de la población local para su crecimiento social y económico; los intereses político-gubernamentales; las necesidades estratégicas de la defensa nacional y, sobre todo, la voluntad de una visión integrada, equilibrada y armónica para la ocupación territorial.

El relieve y el substrato geológico de las partes bajas de las cuencas fluviales en la zona costera sobresalen como uno de los factores geográficos de carácter arquitectónico y estructural, determinado sus rasgos básicos: morfo-

logía-morfometría, estructura, génesis y dinámica. Todas estas características y atributos determinan el grado de consolidación, estabilidad, vulnerabilidad y riesgo para todas las condiciones ecosistémicas y las actividades antropogénicas; lo que señala a la investigación y cartografía geomorfológicas como una de las primeras y primordiales tareas a ejecutar con soporte en los estudios integrados para la planeación de tan sensible franja geográfica.

Basado en experiencias nacionales e internacionales y como resultado de medio siglo de investigaciones geomorfológicas básicas y aplicadas por los autores, se propone y comenta el enfoque y la metodología esquematizada en la figura 3.

1. Enfoque geomorfólogo-geodinámico integral: una propuesta ejecutiva para cuencas costeras

Las investigaciones geomorfológicas en un sentido de integralidad y de multidisciplinariedad, dadas sus interacciones con otras ramas del saber (la geofísica, la geología, la geodesia, la hidrología y la oceanología) demandan un enfoque holístico en la caracterización, análisis y la evaluación del relieve en todas sus facetas: morfología-morfometría, estructura, génesis, dinámica, edad y evolución. Tanto para fines de generación de conocimiento básico u orientado como sus múltiples aplicaciones. A los efectos de la planeación territorial, la gestión ambiental y de riesgos en tercios inferiores de cuencas costeras, sean montañosas o llanas no basta el conocimiento de la estructura y génesis de su relieve sino es indispensable identificar y calcular las tendencias dinámicas de las distintas geoformas de su superficie.

De acuerdo con el control estructural de la costa, la configuración de las cuencas fluviales bajas, del gasto sólido o azolves de ríos, de sus condiciones o no de sedimentación, de la distribución sedimentaria por las corrientes marinas de deriva, de la intensidad del oleaje y otros existen diversos tipos de escenarios como costas abrasivas, elevadas y acantiladas; costas abrasivo-acumulativas, en las que se conjugan el proceso modelador del oleaje y la acumulación sedimentaria entre promontorios, donde se concentra la energía de las olas; las costas acumulativas, generalmente poligenéticas debido a la sedimentación marina, fluvial, palustre, lacustre y eólica. Este último panorama (acumulación marina de playa) resulta ser el más ambicionado por la mayoría de los sectores socioeconómicos, pues reúne las condiciones para los asentamientos humanos y su infraestructura productiva local, la actividad turística y de recreación, para el embarcadero de atraque y de carga pesquera como principales intereses. A su vez, los sectores abrasivos y sus plataformas (terrazas) suelen ser los sitios idóneos para el asentamiento de infraestructuras socioeconómicas que actualmente, se valoran para el enclave de conversores de energía undimotriz a eléctrica (Hernández-Santana *et al.*, 2022), ya

que la garantía de su consolidación y estabilidad, garantiza la vida útil de la construcción civil del emplazamiento.

1.1 Análisis morfológico-morfométrico del relieve de cuencas costeras

Una de las principales tareas del análisis geomorfológico es la caracterización y evaluación de sus formas y dimensiones, aspectos contemplados en el estudio morfológico y morfométrico de su relieve.

Para el caso de costas abrasivas, los tercios inferiores de las cuencas hidrográficas, emprenden levantamientos geodésicos de segundo orden con precisión de dos a tres cm, aunque no se excluyen los de primer orden, de décimas de milímetro de error permisible. Este levantamiento tiene como objetivo conocer la estructura de la costa, las altitudes de sus plataformas antiguas emergidas o terrazas marinas; los ángulos de inclinación de sus superficies, las pendientes de los taludes o pendientes que las articulan, así como la expresión de sus modelados exógenos (planas, onduladas, colinosas, escalonadas y otras) (Hernández-Santana *et al*., 1989; Díaz-Díaz *et al*., 1991). En condiciones de vegetación densa, dificulta el tránsito del equipo geodésico (teodolito, autorreductor, nivel, estación total, etc.) el levantamiento topográfico que requiere abrir las indeseables trochas por los daños a los ecosistemas, podrían emplear un altímetro de alta precisión como la investigación emprendida hecha por Dumas *et al.* (2006) para conocer las huellas de los cambios glacioeustáticos y las pulsaciones tectónicas, reflejadas en la altimetría en los escalones de terrazas marinas (Haití). Actualmente el empleo de GPS de precisión y de las técnicas LiDAR apoyan los levantamientos topográficos y ofrecen información precisa, clara, con alta densidad y resolución espacial, sobre todo de manera barata a diferencia de los métodos bautizados como tradicionales.

Este levantamiento morfológico-morfométrico permite identificar los sitios ideales para las tareas de ingeniería civil en la construcción de infraestructuras, de vialidades y de expansión o asentamientos humanos; tomando en consideración la disminución de la vulnerabilidad a procesos geólogo-geomorfológicos adversos, graduales o súbitos, que dañen su resistencia o minimizan sus efectos. Estos estudios contribuyen, bajo un estricto marco legal y decreto gubernamental que evita la vulnerabilidad construida en los países más pobres. América Latina, por diferentes situaciones, no ha alcanzado resultados eficaces para prevenirla, ejemplo de ello lo palpamos en México cada año durante las inundaciones por eventos hidrometeorológicos extremos, tanto en la costa como en las márgenes fluviales bajas y por los efectos de los procesos gravitacionales o de remoción en masa (popularmente conocidos como deslaves) que evidencian una ausencia de planeación y control gubernamental como de ignorancia social que se suma a la necesidad imperiosa de habitabilidad local.

Para las costas acumulativas, existe un variado universo de geoformas como bermas, barras, cordones litorales y dunas de distinto tipo (en las costas marinas y eólico-marinas); deltas, llanuras de inundación, terrazas, barras, isletas trenzadas, cauces principales y secundarios, meandros abandonados entre otras (en las fluviales); lagunas, terrazas, canales (en las lacustres) y superficies lodosas, microcanales, barras laterales y frontales (las más comunes) en las palustres de humedales costeros. Las formas, las dimensiones y las tendencias dinámicas de estos morfoelementos deben monitorearse frecuentemente para identificar los sectores cambiantes, dinámicos y vulnerables en lo urbano como en lo rural.

En estas llanuras acumulativas las diferencias altimétricas entre sus componentes fluctúan desde algunos decímetros hasta centímetros, por ello se recomienda el uso de niveles geodésicos (digitales, automáticos o electrónicos), el apoyo de un levantamiento LiDAR, el empleo del nivel de manguera para trasladar medidas a nivel en los levantamientos morfológicos de sus perfiles y tipos de relieve en ausencia de equipamiento. Para medir las distancias también pueden usarse cintas métricas y/o distanciómetros, éstos últimos facilitan la precisión, el ahorro de tiempo para desechar la necesidad de abrir senderos en las mediciones. Con esta información se proyectan perfiles y se establecen un levantamiento cartográfico más preciso. Además, con los bancos de datos tridimensionales calculados permiten la elaboración del modelo digital de elevación y procesamiento automatizado en sistemas de información geográfica (ArcGis, QGis y otros) todo ello para evidenciar de forma más clara las redes de drenaje, las microdivisorias de las aguas, las depresiones cerradas y los sitios de sedimentación o erosión intensa, muy importantes en la planeación urbana o territorial.

Para el estudio de las partes más altas del sector costero de una cuenca, ya sea estructural o fluvial, rodeada de lomeríos o montañas, Zhou y Takashi (2006) implementaron la interpretación morfométrica automatizada de los valles fluviales a través de perfiles que resaltan las formas de las pendientes y sus rupturas, los bordes de los niveles erosivos y el espectro fluvial de terrazas. Por su parte, Boucher *et al*. (2006) estudia nivelación y mapeo de terrazas marinas y fluviales con idénticos métodos; de esta manera se obtiene la distribución del patrón de formas del relieve, su geometría de sus dimensiones, para conocer los morfoelementos más estables, consolidados y resistentes en los procesos geomórficos del modelado, reduciendo así la vulnerabilidad y riesgos ante las mismas en condiciones de desarrollo extremo.

Cuando se dispone de información LiDAR o mapas topográficos (planos) a escala grande para estos sectores bajos de las cuencas costeras, se recomienda la aplicación de métodos morfométricos como hipsometría, en metros, decímetros o centímetros y ángulo de inclinación de las pendientes, en grados (Gelabert *et al*., 2005) de profundidad de disección, metros o sus subdivisio-

nes por unidad de área seleccionada de acuerdo con la escala de trabajo (Krzyszkowski y Stachura, 1998) y densidad de disección en longitud fluvial ya en metros o kilómetros ya por dicha unidad areal. Cada uno de ello ofrece una visión general y particular de las áreas más elevadas con mayor inclinación y densidad de drenaje, lo que permite establecer una planeación más adecuada del uso del suelo, velando por la minimización de los peligros y la reducción de la vulnerabilidad ante ellos como es el caso las inundaciones y potenciales penetraciones marinas.

1.2 Análisis morfoestructural de la costa

La visión morfoestructural del relieve descansa en la información estructurogeológica, tectónica y litológica disponibles con fines para determinar el papel de las deformaciones tectónicas, en la conformación del relieve de las cuencas costeras, el tipo de estructuras que lo conforman (masivas o monolíticas); si presentan un carácter horizontal o subhorizontal, monoclinal, plegado o sobrecorrido como en formaciones sedimentarias y rocas metamórficas deformadas. Cuando son de composición caótica como conglomerados y brechas constituyen cuerpos sedimentarios jóvenes no consolidados, por ejemplo marinos, eólicos, fluviales, lacustres y palustres, formadores de sediplanos, entre los principales.

La importancia de la comparación geólogo-geomorfológica radica en conocer el grado de estabilidad del subsuelo y resistencia de la litología en los diferentes tipos de modelados exógenos, como el erosivo, denudativo, kárstico, sufosivo, eólico, marino y otros. En este sentido, la litología como agente pasivo, evidencia el grado de su desarrollo potencial y de las consecuencias morfodinámicas del relieve con implicaciones de vulnerabilidad en las infraestructuras sociales y económicas.

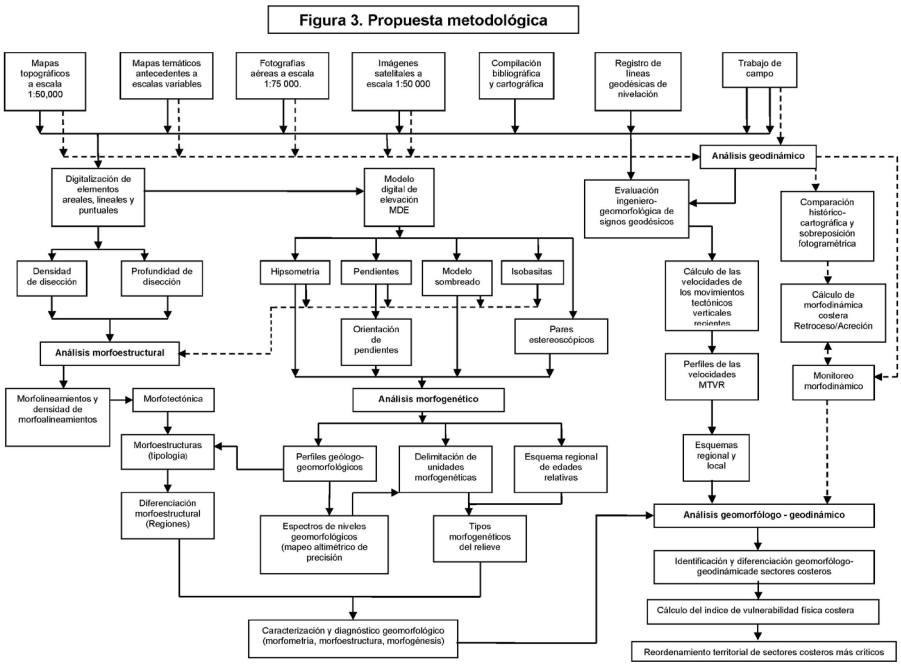
Para regiones costeras amplias, es aconsejable la determinación y la cartografía de todas las fallas y fracturas reflejadas en el relieve, como paso previo para su análisis morfotectónico y morfoestructural. De esta manera, el trabajo de campo debe dirigirse al análisis sedimentológico de los depósitos costeros jóvenes, las anomalías tectónicas regionales y locales, a las relaciones estratigráficas del relieve, los aspectos estructurales de yacencia, de verificación de límites entre tipos morfogenéticos y otros aspectos que garanticen la vida útil de la infraestructura productiva, la seguridad social y estabilidad ecológica.

Por otro lado, el estudio de las condiciones morfoestructurales de las cuencas costeras, existen innumerables métodos, ente ellos: interpretación estructural y su influencia en la formación del relieve, utilizando imágenes satelitales, de radar, ortofotos y fotografías aéreas, preferentemente a gran escala; perfilación longitudinal y transversal del relieve costero, con datos LiDAR o de nivelaciones de precisión, reflejando la estructura geológica interna; determinación del papel de fallas y fracturas en la conformación de la cuenca

costera mediante deformaciones en cortes geológicos y espectro de niveles geomorfológicos (cimas cumbrales de montañas, de lomeríos y de llanuras colinosas y onduladas, e incluso las planas); interpretación de los patrones de las cuencas y su red fluvial como indicador de control estructural del relieve local y regional; en dependencia de la esencia geográfica de cada localidad.

La caracterización y evaluación morfoestructural correlaciona el plano morfoestructural, los tipos morfogenéticos del relieve y sus indicadores morfométricos con cálculos de la tectónica reciente por métodos geodésicos y/o geotecnológicos más modernos, de esta forma identifica cuáles estructuras son las más móviles y dónde, en el caso de costas sísmicas, se producirían los desplazamientos horizontales o verticales más relevantes y sus efectos ante la vulnerabilidad de la población en sus áreas productivas, desde el punto de vista económico.

Figura 3. Propuesta metodológica para el estudio geomorfológico costero, bajo una óptica integral.



Fuente: elaboración propia.

Es importante destacar el conocimiento sobre las magnitudes y las tendencias geodinámicas de las estructuras y sus dimensiones considerado los

polígonos de monitoreo sísmico como precursor que estimula cuándo y con qué magnitud podría esperarse un evento telúrico. Existen numerosos ejemplos de estas investigaciones en la falla San Andrés (Romero-Andrade et al., 2022) donde se reportan tasas de deslizamiento en fallas 7,2 ± 2,8 mm/año (Guns *et al*., 2021), en el polígono geodinámico complejo de Santiago de Cuba (Lilienberg *et al*., 1993), desplazamientos verticales entre +1 y -6 mm/año y varios polígonos de Asia Central con las cordilleras del Köpetdag. Walker *et al.* (2021) registraron una tasa lateral derecha de 9,1 ± 1,3 mm/año en la falla principal; Ashgabat, Asia central, reporta tasas anuales promedio de contracción de 6-8 ± 2 mm/año en la dirección ortogonal rumbo a la cordillera mediante observaciones GPS de precisión (Kuzmin y Fattakhov, 2022). Tian Shan, revela un cabalgamiento de velocidad en el empuje de aproximadamente 20-25 mm/año (Pevnev *et al*., 1979) y bajo el desarrollo del sistema de monitoreo geofísico integrado, y la metodología para el seguimiento magneto-telúrico azimutal como previsión de eventos catastróficos (Bataleva, 2021).

Estas investigaciones revelan valores geodinámicos en los sitios seleccionados para el monitoreo e indican con registros de todos los campos geofísicos y de la estructura profunda y superficial de la corteza terrestre, establecer paulatinamente diferentes escenarios potenciales de ocurrencia con terremotos fuertes; sobre todo en aquellas estructuras que muestren tendencia sostenidas de deformación en un solo sentido (ascendente o descendente). Generalmente, las regiones donde la geodinámica es de carácter oscilatorio, la energía se libera y se compensa gradualmente, generando eventos sísmicos más moderados. Para evaluaciones de cuencas costeras en regiones sismogénicas es importante el establecimiento de estos monitoreos cuyos resultados desafortunadamente requieren de décadas de mediciones instrumentales.

A los efectos de clasificación tipológica morfoestructural y de su representación cartográfica en los tercios inferiores de las cuencas costeras, es indispensable el establecimiento jerárquico de niveles de clasificación como: basamento geológico, carácter litológico del modelado exógeno, categorías (montañas, lomeríos y llanuras) y subcategorías del relieve emergido (montañas altas, medias, bajas, premontañas. Se excluyen las montañas muy altas, pues no ocupan, directamente la franja costera; lomeríos altos, medianos y bajos; llanuras muy altas, altas, medianas, bajas y muy bajas). Sistemas geotectónicos de interrelaciones tridimensionales entre bloques como indicador del patrón geométrico y del campo (esfuerzo deformador de la morfoestructura) y el carácter morfoestructural interno de cada unidad morfotectónica. Ilustran esta propuesta los trabajos realizados en Cuba (Díaz-Díaz *et al*., 1989; Hernández-Santana *et al*., 1995; Zamorano *et al*., 2000) y en México (Hernández-Santana *et al*., 2005, 2009; Garatachia-Ramírez, 2017). En dependencia de la extensión territorial de la cuenca costera, estas clasificaciones deben contemplar sus correlaciones con los campos geofísicos como el gravimétrico y el

magnetométrico (Pérez-Flores *et al.*, 2004) como el sísmico (Tapia-Gutiérrez, s.f.) y de configuración de las isosistas (Hernández-Santana *et al.*, 1991) con miras a precisar, aún más, las raíces de las estructuras geológicas; su conexión con la formación del relieve y comportamiento geodinámico o sismotectónico en regiones costeras sismogénicas, fundamentalmente ante proyectos constructivos y desarrollos urbanos.

Especial tratamiento requerido en regiones de marcada subsidencia, bajo un régimen sostenido y gradual; subsidencia súbita provocada por movimientos sísmicos de alta magnitud que presentan de manera muy precisa en los estudios de F. Orellana *et al.* (2022) mediante el uso de interferometría SAR y del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS, según siglas en inglés). Las localidades que experimenten estos desplazamientos de hundimiento deben incluir estudios geotécnicos precisos, para efectos de determinar la vulnerabilidad sísmica de los sitios, con miras de restringir la implementación de grandes inversiones en el desarrollo que pudieran aumentar los riesgos frente a futuros movimientos descendentes y estremecimientos. Para estos casos es importante establecer protocolos de normas y diseños sismorresistentes tratando de establecer construcciones en las áreas con litologías consolidadas y monolíticas que pudieran reducir el efecto de la amplificación de los estremecimientos durante eventos sísmicos de gran magnitud.

En partes muy bajas de cuencas costeras, estos movimientos telúricos generan penetraciones marinas de consideración, producto de tsunamis, lo que valora los trabajos de planeación urbana y territorial. Para ello, es indispensable el análisis del comportamiento histórico de dicho fenómeno.

1.3 Análisis morfogenético de la costa

Una de las líneas científicas y cartográficas más reconocidas de estudio del relieve lo constituye el levantamiento morfogenético a diferentes escalas, denominado también geomorfológico general; cuando se incluye la datación de sus tipos. En el caso que no incluya la datación, se considera como un levantamiento de tipo morfogenético del relieve. El conocimiento del origen y desarrollo del relieve permite precisar cuáles procesos geomórficos han actuado en su consolidación y precisar cómo pueden actuar a futuro sobre el medio ambiente con una acepción más amplia; incluyendo la naturaleza, sociedad y economía.

Los primeros esfuerzos para identificar los tipos morfogenéticos del relieve y su complejo de formas de distinta génesis deben concentrarse en la interpretación de las imágenes satelitales de alta resolución, las ortofotos y las fotografías aéreas a escala grande, así como el empleo de levantamientos LiDAR o de mapas topográficos a escala grande (1:10 000 y hasta 1:25 000). Los resultados de estas tareas y de análisis correlativos geólogo-geomorfológicos propician el conocimiento básico de la cuenca costera como su litoral para

efectos de precisar la génesis de las geoformas y las tendencias de su evolución constituyendo las bases para su clasificación y representación cartográfica.

Una etapa ulterior incluye recorridos de campo previamente planeados en función de la complejidad del relieve de los sitios, de la necesidad de definir el origen de acuerdo con los tipos genéticos de depósitos en llanuras acumulativas o erosivo-acumulativas de distinto origen; del esclarecimiento del espectro de terrazas marinas, fluviales y otras superficies de la cuenca costera mediante nivelaciones instrumentales o por métodos geotecnológicos; de identificación y clasificación genética de las geoformas, precisar los límites bruscos o transicionales entre los tipos morfogenéticos de las partes bajas y muy bajas de las cuencas. En llanuras poligenéticas y palustres es común que la transición sea gradual, reflejándose mayormente en el carácter interdigitado de la sedimentación de distinta génesis y granulometría (Méndez-Linares *et al.*, 2007).

Concluida esta etapa, debe procesarse toda la información efectiva para delinear, con mayor precisión, los límites entre los tipos genéticos del relieve, establecer los símbolos y la escala colorimétrica para cada génesis. Se puede considerar la necesidad de verificación en campo, cuando los casos lo ameriten, sobre todo en sectores con evidencias genéticas débiles o hipotéticas.

Como parte de una adecuada lectura cartográfica, una de las premisas básicas a considerar es la plasticidad artística de la obra, considerando siempre símbolos y colores de convenciones geomorfológicas internacionales, expresando al investigador o al lector profesional de amplio espectro, las características y atributos de los procesos geomórficos y de las superficies que ellos modelan y generan. Cuando esto se cumple bajo un marco establecido y reconocido por la comunidad profesional, entonces se posibilita la uniformidad en la comprensión temática. Esta consideración es requerida por la mayoría de las ciencias naturales y sus expresiones cartográficas. Gustavsson *et al*. (2006) presenta una metodología para la representación a escala grande basada en una combinación de símbolos, aspectos morfométricos, litológicos y estructurales con una gama de colores ajustada a la lógica de la vigorosidad del relieve que resulta útil para la toma de decisiones en la representación, aunque se debe recordar que el contenido de un mapa geomorfológico solo debe reflejar las cualidades del relieve; los aspectos geológicos, pedológicos u otros, deben referirse en la monografía correspondiente o en mapas específicos, pero no el mapa geomorfológico general que evita una carga inapropiada en un lectura eficaz y análisis concreto.

Los enfoques para establecer la clasificación morfogenética del relieve pueden ser variados; una de las visiones más concreta y específica fue propuesta por Lilienberg (1970) y Portela *et al.* (1989) (Figura 4):

Nivel I - Tipos y complejos de formas del relieve.
Nivel II - Tipos de relieve.
Nivel III - Categorías del relieve (montañas, lomeríos y llanuras).
Nivel IV - Estructura-génesis. En el caso de las llanuras (marinas, fluviomarinas, fluviales, lacustres, denudativas, estructuro-tectónicas); en los lomeríos (erosivos, petrogénicos, estructuro-tectónicos); y en las montañas (domos-bloques, erosivo-tectónicos, bloques erosivo-tectónicos, bloques petrogénicos) entre otros.
Nivel V - Morfografía del modelado en las llanuras (planas, onduladas, colinosas, muy colinosas) y montañas (ligeramente diseccionadas, moderadamente diseccionadas, fuertemente diseccionadas, etc.).
Nivel VI - Morfometría (altitud - H - y altura relativa - h -, en m).
Nivel VII - Edad del relieve.
Nivel VIII - Formas del relieve (marinas, fluviales, kársticas, petrogénicas, estructuro-tectónicas, eólicas, biogénicas, quimiogénicas y otras).

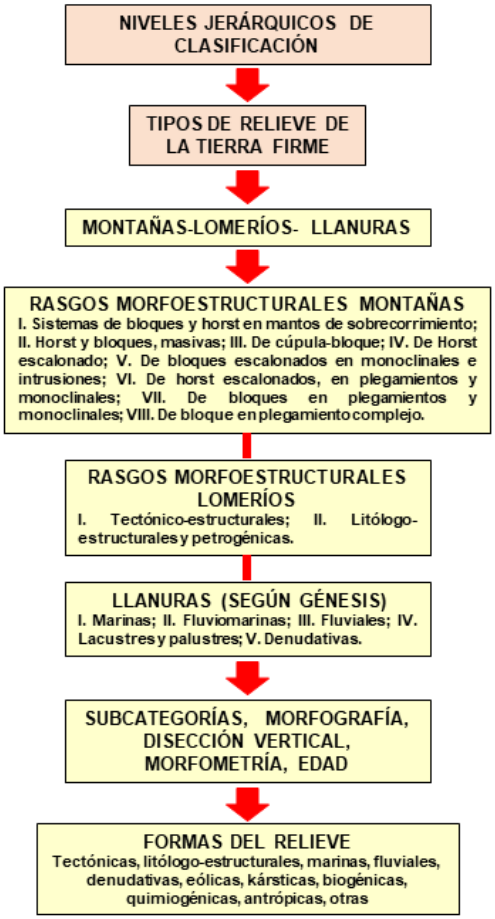
Los tipos de relieve (representados por polígonos, según el lenguaje de los SIGs), se representan con fondo cualitativo de color tratando de mantener la plástica altimétrica, destacando las llanuras en colores fríos como el azul (génesis marina), el verde claro (génesis fluvial), el verde grisáceo (génesis palustre) y el amarillo para las denudativas como ejemplo. Cabe resaltar que el color azul se utiliza en las llanuras de esa génesis, pues ese color se reserva exclusivamente los tipos del relieve submarino y formas marinas. Para los lomeríos se acostumbra el empleo de color amarillo fuerte, rosado, naranja claro y hasta beige. Finalmente, las montañas transitan por café claro, medio, oscuro, gamas de rojos y morados. Esta combinación impregna en los sentidos del lector, la sensación de profundidad y estatura del relieve.

Con relación a las formas del relieve no existen criterios unificados, aunque en la mayoría de sus representaciones en símbolos y signos, se emplean la siguiente gama: rojo (tectónicas), rojo vino (estructurales), azul (marinas), amarillo (eólicas), café (denudativas), verde (erosivas y fluviales), verde grisáceo (palustres), azul aqua (lacustres), naranja (kársticas), negro (antrópicas) y, otros colores y tonos según la presencia de determinadas geoformas en la cuenca costera. Sobre esta convención colorimétrica de la génesis geomorfológica, A. I. Spiridonov (1974, 1981) desarrolla diversos criterios, todos muy cercanos a lo enunciado anteriormente.

El análisis morfogenético del relieve en cuencas costeras es de gran importancia para la planeación territorial o urbana, ya que por la juventud de sus geoformas resulta indispensable conocer de su estructura y aspectos morfológico-morfométricos, el tipo y carácter de los procesos de su formación; algunos de consolidación estructural y otros de modelación o desintegración de sus superficies. La estructura y la génesis determinan las dimensiones del

nivel de estabilidad de relieve, cualidades que contribuyen en la evaluación del grado de vulnerabilidad ante dichos procesos formadores (veces activas en el presente) o de otros relacionados con las situaciones sinópticas de la atmósfera como los fenómenos hidrometeorológicos extremos tanto pluviales en zonas tropicales como nivales (nieve) y glaciales en las altas latitudes.

Figura 4. Niveles jerárquicos de la clasificación del relieve



Fuente: según Portela-Peraza *et al.* (1989).

1.4 Análisis geodinámico y morfodinámico de la costa

Los análisis anteriores, caracterizan y clasifican la estructura y la génesis de las geoformas del relieve como condiciones de su estabilidad, no así con el

análisis geodinámico del subsuelo por compactación sedimentaria o de desplazamientos por causas más profundas, tanto de la estructura geológica superficial como de la corteza terrestre. El análisis geodinámico está estrechamente relacionado con la movilidad e inestabilidad del relieve, condición determinante de las áreas más peligrosas y mayor expresión de la vulnerabilidad, física como la construida en dichos sitios.

Los estudios tradicionales se basan en la revisión de la existencia de ciclos de nivelación reiterada de alta precisión, con el objeto de identificar, mediante cálculo geodésico, aquellos tipos de relieve y geoformas que presentan un carácter sostenido al ascenso o descenso, a la oscilación de los sentidos del desplazamiento o a la caída brusca y escalonada de los movimientos; estos últimos con un período temporal estable e inestable. Para descartar la existencia de desplazamientos inducidos por otras fuerzas, generalmente de carácter antrópico, se realiza previamente una inspección ingeniero-geomorfológica de campo (Lilienberg, 1993), donde se valoran diferentes condiciones:

a. Estado del monumento (calidad técnica, existencia de deterioro mecánico, grado de corrosión, nivel de fijación en el terreno, resistencia de la cimentación y deformaciones).
b. Estado de la obra de fijación (tipo de obra: monolito, substrato rocoso, edificio, puente, alcantarilla, banqueta, escalera, etc.), calidad de la obra (mampostería, albañilería, cimentación, losas de hormigón, etc.), y existencia de deformaciones exteriores (fisuras, grietas, su carácter y dimensiones); deformaciones del fundamento, reconstrucciones, etc.
c. Características ingeniero-geológicas del substrato (litología del substrato, potencia sedimentaria, susceptibilidad deformativa del suelo, procesos geomorfológicos exógenos y profundidad del manto freático).
d. Particularidades de la ubicación (con relación a los morfoelementos, con respecto al plano morfoestructural y de acuerdo con las evidencias de movimientos neotectónicos).
e. Factores regionales especiales (influencias de las cargas dinámicas del transporte automotor, del bombeo intensivo de las aguas subterráneas, presencia de embalses, de grandes centros urbanos, de la sismicidad y otras).

Este análisis permite identificar cuáles signos geodésicos gozan de buena estabilidad para calcular los desplazamientos tectónicos recientes. Realizados los cálculos geodésicos, se confeccionan los perfiles sobre las velocidades y los gradientes de los movimientos tectónicos verticales recientes; se correlacionan con los tipos morfoestructurales y morfogenéticos del relieve, para establecer esquemas geodinámicos de la cuenca costera e identificar las áreas más inestables. Diversos detalles técnicos sobre esta metodología geodésica-geo-

morfológica pueden consultarse en Lilienberg *et al.* (1993) y en Hernández-Santana *et al.* (2021).

Otro aspecto de vital importancia para el manejo de la cuenca costera radica en el conocimiento de la morfodinámica de la línea costera. Muchas construcciones litorales prefieren, por su valor estético o proximidad a la costa, ampliar sus instalaciones muy cerca del litoral. Ante un panorama global y local de ascenso del nivel medio del mar, la interacción del interfase terrestre-marino motivado por desajustes en el equilibrio de la formación de los perfiles costeros y del retroceso o acreción de la costa con sus consecuentes problemáticas jurídicas, físicas y sociales; aspecto que las autoridades y los pobladores deben considerar razonadamente.

En las dos últimas décadas el análisis de líneas de costa mediante el uso comparativo de fotografías aéreas georreferenciadas como puntos de control, de ortofotos digitales e imágenes satelitales de alta resolución, han permitido bajo el auxilio de sistemas de procesamiento como el Digital Shoreline Analysis System (D.S.A.S.) montada en el software ArcGis las tasas del movimiento neto de la costa y la tasa de punto final (Bustamante *et al*., 2016; Mancera *et al*., 2020; Morales *et al*., 2022).

Ejemplos de este análisis se encuentran en los estudios de Thieler *et al.* (1999) para la costa atlántica de los Estados Unidos de América y de Morales *et al.* (2022) para la costa veracruzana. Esta aplicación permite calcular los cambios de línea de costa en diferentes temporalidades para poder conocer la dinámica de la vulnerabilidad ante este proceso marino. Infraestructuras que se localizan a cierta distancia de la costa, pero que en algunas décadas de retroceso costero estarían bajo un fuerte estrés de cambio que dinamizan el carácter de su nivel de vulnerabilidad. Este aspecto es de gran significado para la planeación, tomando en cuenta escenarios de cambio en el corto y mediano plazo. Cabe destacar que sí los procesos naturales son dinámicos y evolucionan con el tiempo, también la vulnerabilidad está sujeta a sus variaciones y efectos.

1.5 Índices de vulnerabilidad costera: una herramienta útil en la planeación costera y en la gestión de riesgos.

Una vez clasificado y cartografiado el relieve de la cuenca costera, sobre bases estructuro-geológicas y morfogenéticas, el próximo paso es la aplicación de métodos de investigación sobre la geodinámica local del subsuelo y/o regional de la corteza terrestre sobre la morfodinámica costera con vistas a identificar los sitios con mayor nivel de amenaza de movilidad e inestabilidad para estimar su nivel de vulnerabilidad.

Desde finales siglo XX hasta el presente, varios especialistas centraron su estudio en la construcción y la aplicación de un índice de vulnerabilidad para sistemas costeros Gornitz *et al.* (1992, 1994, 1997), Thieler y Hammer-Close

(1999), Hammer-Close y Thieler (2001), Diez *et al.* (2007), McLaughlin y Cooper (2010), Palmer *et al.* (2011), Kumar y Kunte (2012), Núñez *et al.* (2016), Mancera (2022), entre otros. La propia esencia de la interacción tierra-mar determina la complejidad para la elaboración de este índice pues resulta fundamental y puede ser estandarizada mediante una codificación numérica que puede definirse como "una metodología cuantitativa aplicada en los estudios de morfodinámica y manejo de las costas, a través de la cual es posible determinar su nivel de vulnerabilidad" (Mancera, 2022).

De acuerdo con Thieler y Hammer-Close (1999), para la determinación de la vulnerabilidad física de la costa (IVFC) se puede emplear la fórmula siguiente:

$$IVFC = \sqrt{a \cdot b \cdot c \cdot d \cdot e \cdot f \cdot g \cdot h \cdot i \cdot j \cdot k \cdot l \cdot ll} / n \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde: a, elevación promedio de la costa (en m); b, resistencia del substrato geológico (por codificación numérica); c, carácter acumulativo o no del microrrelieve (por codificación numérica); d, altura promedio de las olas (m), conectada a los desastres de penetraciones marinas; e, rango predominante del régimen mareográfico (en cm); f, rango de ascenso del nivel medio del mar (mm/año); g, susceptibilidad a inundaciones fluviales y/o penetraciones marinas por huracanes u olas de surgencia por tormentas intensas (por codificación numérica); h, pendiente de la playa (en ^{o}); i, estructura geomorfológica de la costa (por codificación numérica); j, dirección predominante del viento; k, duración de las tormentas (por codificación numérica); l, retroceso costero (en m/año); y ll, magnitud de las velocidades de los movimientos tectónicos verticales recientes (mm/año). Este último aspecto añadido por los autores para considerar el nivel de estabilidad del subsuelo y la corteza (pudiera incrementar) el nivel de vulnerabilidad física y social.

Finalmente, Thieler y Hammer-Close (1999) exponen parámetros codificados del 1 al 5, siendo este último valor el que corresponde a los sectores de la cuenca costera con mayor nivel de vulnerabilidad.

En fecha reciente y tomando en consideración los resultados de los índices de los autores relacionados anteriormente, Mancera (2022) propone un índice de vulnerabilidad costera para el sector costero septentrional del municipio Actopan en la costa del estado de Veracruz, México. Para ello, seleccionó 15 variables como: (a) tasa de cambio de la línea de costa, (b) ancho de playa, (c) ancho de duna, (d) estado morfodinámico, (e) distancia a la isobata de 20 m, (f) geología, (g) geomorfología, (h) elevación, (i) pendiente, (j) porcentaje de afloramiento rocoso, (k) marea de tormenta, (l) ríos y desembocadura, (m) distancia de la vegetación detrás de la playa, (n) vías de comunicación y (ñ) uso de suelo. Definitivamente proponer la fórmula con solo seis de las variables evaluadas donde 1 (vulnerabilidad muy baja) y 5 (vulnerabilidad muy alta).

Para las cuencas costeras, tanto en lo local como en lo regional, es imprescindible la aplicación del índice de vulnerabilidad costera pues permite valorar integralmente cuáles variables son determinantes y, con ellas, calcular no solo el nivel de vulnerabilidad, sino expresar espacialmente su distribución mediante una zonificación e indicar los sectores más expuestos a las penetraciones marinas e inundaciones fluviales durante el paso de fenómenos hidrometeorológicos extremos frecuentes en México entre junio y octubre.

La zonificación de la vulnerabilidad permite apreciar aquellos sectores costeros más críticos que trazan pautas a la hora de emprender un proceso de reordenamiento territorial o urbano, bajo las normas mexicanas establecidas por la SEMARNAT (1988, 2003), convalidadas por los estándares internacionales en esta materia y tomando en consideración no sólo la etapa técnica sino también las etapas de consenso social, mediante talleres y consulta pública, estableciendo escenarios de planeación hasta llegar al modelo de ocupación territorial.

Conclusiones

Las cuencas costeras y sobre todo sus tercios inferiores aledaños al mar se presentan como zonas complejas de transición tierra-mar, donde ocurre un sostenido e intenso intercambio de materia y energía, bajo la interacción de procesos litosféricos, hidrosféricos y atmosféricos, en yuxtaposición con las actividades productivas y sociales de la población, que ocuparon áreas en momentos que no se practicaba la planeación territorial y urbana. Hoy esta situación se acentúa por el desconocimiento e incluso por la necesidad de residencia y empleo laboral de los sectores más pobres de la sociedad.

La condición de la estructura geológica y del relieve como elementos arquitectónicos de la formación del paisaje, obliga a la investigación de sus características, de su génesis y de su geodinámica, con vistas a identificar los sitios sujetos a mayor movilidad y cambios, representa peligros de acción retardada o gradual o súbita. En este sentido, la aplicación del índice de vulnerabilidad costera resulta vital para reconocer los diferentes niveles de vulnerabilidad física y social como base de la gestión de riesgo en el proceso de reordenamiento territorial y urbano de la costa.

Un aspecto de suma precisión para los nuevos proyectos de infraestructura productiva o habitacional es el referente al ascenso del nivel medio del mar, pues los estimados internacionales consideran valores aproximados de medio metro para finales del presente siglo. Para las cuencas costeras bajas y muy bajas debe calcularse el régimen tectónico reciente, su tendencia y toma de decisiones sabias para aquellas donde la subsidencia esté presente, ya que, se incrementa el peligro de penetración marina y nivel de vulnerabilidad física de la población.

A lo largo de la historia, las migraciones han surgido como resultado de alguna amenaza guerrerista, frustración política, aspiración social o económica, situación ambiental, entre otras. El presente y futuro inmediato y mediano plazo es una de las causas migratorias en la zona costera, actua como la necesidad de abandonar esta franja, debido a la invasión marina. Ante este panorama, las autoridades gubernamentales de todos los niveles, el sector privado, las organizaciones civiles y la sociedad tienen que tomar medidas previsoras y establecer los nuevos desarrollos de todo tipo; sitios que garanticen la estabilidad productiva y el hábitat humano gradual (proceso de "oceanización") de la zona litoral y costera que impacta también en los frágiles ecosistemas de los humedales, las playas arenosas y dunares costeros.

Las sociedades global y local aún están a tiempo de racionalizar su presencia no solo en la franja costera, sino en todos aquellos territorios donde los procesos naturales posean intensos gradientes energéticos y cambios sobre la superficie terrestre. Con ello, reducir la vulnerabilidad física y social, facilitar el equilibrio evolutivo de los ecosistemas, reduciendo la necesidad de usar fondos permanentes de indemnización por daños a la población que tanto atentan contra el producto interno bruto del país y el crecimiento de la economía nacional.

Bibliografía

Bataleva, E. A. (2021). Integrated geodynamic studies of the Tien Shan lithosphere: state and prospects. IOP Conf. Series: Earth and Environmental *Science*, DOI:10.1088/1755-1315/867/1/012001

Bewley, G. P., Lathrop, D. P., Katepalli R. Sreenivasan., K.R. (2006). Subsidence and flooding in New Orlean. *Nature*, 44:587-588. DOI:10.1038/441587

Bott, L. M., Schone, T., Illigner, J., Haghshenas Haghighi, M., Gisevius, K., Braun, B. (2021). Land subsidence in Jakarta and Semarang Bay - The relationship between physical processes, risk perception, and household adaptation. *Ocean and Coastal Management,* 211:105775. DOI:10.1016/j.ocecoaman.2021.105775

Boucher, E., Arseneault, D., Hétu, B. (2006). Late Holocene development of a floodplain along a small meandering stream, northern Québec, Canada. *Geomorphology, 80* (3-4):267-281. DOI:10.1016/j.geomorph.2006.02.014

Brain, M. J. (2016). Past, Present and Future Perspectives of Sediment Compaction as a Driver of Relative Sea Level and Coastal Change. *Current Climate Change Reports*, 2:75-85. DOI:10.1007/s40641-016-0038-6

Bustamante Fernández, J. E., Méndez Linares, A. P., Hernández Santana, J. R. (2016). Cambios morfodinámicos hiperanuales (1951-2007) de la línea costera entre Punta Diamante y Río Papagayo, Acapulco, México. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 71:301-322. DOI: 10.21138/bage.2284

Changxing, S., Dian, Z., Lianyuan,Y., Bingyuan, L., Zulu, Z., Ouyang, Z. (2007). Land subsidence as a result of sediment consolidation in the Yellow River Delta. *Journal of Coastal Research, 23* (1), 173-181. DOI:10.2112/39951.1

Coch, N. K. (2020). Inland damage from hurricanes. *Journal of Coastal Research, 36*(5): 1093-1105. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-20A-00002.1

Díaz-Díaz, J. L., Magaz García, A. R., Hernández Santana, J. R., Venereo Morales, A., Pérez Cárdenas, F. (1991). Reconstrucción tectónica local mediante el análisis de la morfoescultura marina en la franja costera Río Seco-Punta Maisí, provincia de Guantánamo, Cuba. En *Morfotectónica de Cuba Oriental*. Ed. Academia, La Habana, pp.19 -23.

Diez, P. G., Perillo G., Piccolo, M. C. (2007). Vulnerability to the sea-level rice on the coast of the Buenos Aires. *Journal of Coastal Research, 23*(1):119-126. DOI:10.2112/04-0205.1.

Dumas, B., Hoang, C. T., Raffy, J. (2006). Record of MIS 5 sea-level highstands based on U/Th dated coral terraces of Haiti. *Quaternary International*, 145/146:106-118. DOI:10.1016/j.quaint.2005.07.010.

Ebinuma, T. y Kato, T. (2012). Dynamic characteristics of very-high-rate GPS observations for seismology. *Earth Planets Space, 64*:369-377. DOI: 10.5047/eps.2011.11.005.

Estacio-Ferro, J. (2018). El Río San Juan: dos siglos de conflictos entre Costa Rica y Nicaragua. *Revista Electrónica Iberoamericana, 12*(1):1-32.

Galloway, D. L., Cplin, L. S. (s.f.). Subsidence and uplift in the coastal plain near Houston, Texas, mapped in spatial detail from space. In *Subsidence and the Changing Shoreline*, p. 133. https://www.tceq.texas.gov/assets/public/comm_exec/pubs/gbnep/gbnep-T5/gbnep_T5_123-136.pdf

Garatachia-Ramírez, J. C. (2017). *Peligro sísmico en Tijuana, Baja California: una evaluación geodinámica mediante tecnologías de la información geográfica*. Tesis de maestría, UNAM, 214 pp.

Gelabert, B., Fornós, J. J., Pardo, J. E., Roselló, V. M., Segura, F. (2005). Structurally controlled drainage basin development in the south of Menoría (western mediterranean, Spain). *Geomorphology, 65*(1-2):139-155. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.08.005

Gornitz, V. M. y White T. W. (1992). *A coastal hazards data base for the US east coast*. Oak Ridge National Laboratory.

Gornitz, V., Daniels, R., White, T., Birdwell, K. (1994). The development of a coastal risk assessent database: Vulnerability to sea-level-rise in the U.S. Southeast. *Journal of Coastal Research,* 12:327-338. https://www.jstor.org/stable/4300410

Gornitz, V., Rosenzweig, C., Hillel, D. (1997). Effects of anthropogenic intervention in the land hydrologic cycle on global sea level rise. *Global and Planetary Change*, 14:147-161. DOI:10.1016/S0921-8181(96)00008-2

Guns, K. A., Bennett, R. A., Spinler, J. C., McGill, S. F. (2021). New geodetic constraints on southern San Andreas fault-slip rates, San Gorgonio Pass, *California. Geosphere, 17*(1):39-68. DOI: 10.1130/GES02239.1

Gustavsson, M., Kolstrup, E., Seijmonsbergen, A. C. (2006). A new symbol-and-GIS based detailled geomorphological mapping system: Renewal of a scientific discipline for understanding landscape development. *Geomorphology, 77*(1-2):90-111. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.01.026

Hammer-Close, E. y Thieler, R. (2001). *Coastal vulnerability to sea-level rice: A preliminary data base for the US Atlantic, Pacific and Gulf of Mexico coasts*. Woods Hole, MA: United States Geological Survey.

Hairuo Yu, Huili Gong, Beibei Chen (2022). Analysis of superposition effect of land subsidence and sea level rise in Tianjin coastal area and its emerging risks. *Hydrological Processes* (pre-print). DOI: 10.22541/au.164753992.25635868/v1

Hernández-Santana, J. R., González Ortiz, R., Venereo Morales, A., Pérez Cárdenas, F. (1989). Deformaciones tectónicas de las terrazas marinas de la Sierra Maestra, Cuba. *Ciencias de la Tierra y del Espacio*, 15-16:115-130.

Hernández-Santana, J. R., Chuy-Rodríguez, T., González Ortiz, R. (1991). *Influencia de las características morfoestructurales sobre la atenuación sísmica en Cuba suroriental*. Ed. Academia, La Habana, 15 pp.

Hernández-Santana, J. R., Magaz García, A. R., Ortiz Pérez, M. A., Zamorano Orozco, J. J. (1995). Clasificación morfoestructural (tipológica) y morfotectónica (regional) del relieve oriental cubano: modelo insular de transición interplacas. *Investigaciones Geográficas*, 3 especial:13-35.

Hernández-Santana, J. R. (1999). Interacción tierra-mar en condiciones de subsidencia reciente sostenida de la corteza terrestre y riesgos ambientales insulares: Cuba Oriental, Grandes Antillas. En *El Caribe: contribución al conocimiento de su geografía*. La Habana, Ed. GIDO - ALVIGRAF, pp. 29-34.

Hernández-Santana, J. R., Ortiz-Pérez, M. A. (2005). Análisis morfoestructural de las cuencas hidrográficas de los ríos Sabana y Papagayo (tercio medio-inferior), Estado de Guerrero, México. *Investigaciones Geográficas*, 56:7-25. DOI: 10.14350/rig.30093

Hernández-Santana, J. R., Ortiz-Pérez, M. A., Méndez-Linares, A. P., Gama-Campillo, L. (2008). Reconocimiento morfodinámico de la línea de costa del Estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Investigaciones Geográficas*, 65:7-21. ISSN: 0188-4611. DOI: 10.14350/rig.17971

Hernández-Santana, J. R., M. A. Ortiz-Pérez, M., Figueroa-Mah-Eng (2009). Análisis morfoestructural del Estado de Oaxaca, México: un enfoque de clasificación tipológica del relieve. *Investigaciones Geográficas*, 68:7-24. DOI: 10.14350/rig.17995

Hernández-Santana, J. R., Espinosa-Rodríguez, L. M., Méndez-Linares, A. P., Ordaz-Hernández, A., Garatachía-Ramírez, J. C., Dávila-Hernández, N. A. (2021). Geodinámica reciente del relieve: expresiones de la tectogénesis regional y la morfo-

génesis fluvial local en la planeación territorial y gestión del riesgo (pp.156-188). En José Emilio Baró Suárez, José Ramón Hernández Santana y Enrique Guevara Ortiz. *Métodos y técnicas de monitoreo y predicción temprana en los escenarios de riesgos socionaturales*. UAEM; CLAVE Editorial-AM Editores, 484 pp.

Hernández-Santana, J. R., Méndez-Linares, A. P. y Ordaz-Hernández, A. (coords.) (2022). *Energía undimotriz en la costa veracruzana, México: una evaluación geólogo-geomorfológica de sitios idóneos para el emplazamiento de prototipos ingenieriles*. Colección "Energías Renovables del Océano". CEMIE_O; Universidad Autónoma de Campeche, 375 pp. DOI: 10.26359/EPOMEX.CEMIE022022

Hu, H. M., Huang, L. R., Wang, R. B. (1994). Recent vertical crustal movement and land deformation in the Huanghe delta and adjacent areas. In: Ren, M. E. (ed.), Impacts of Sea Level Rise on Delta areas in China and Countermeasures. B*eijing: Science Press*, pp. 92-99.

Ingebritse, S. E., Galloway, D. L., (2014). Coastal subsidence and relative sea level rise. *Environmental Research Letters*, 9:091.002. DOI:10.1088/1748-9326/9/9/091002.

IPCC, 2007. *Four Assessment Report: Climate Change 2007*. http://en.wikipedia.org/wiki/Intergovernmental_Panel_on_Climate_Change #IPCC_Fourth_Assessment_Report: _Climate_Change_2007

IPCC (2019). Resumen para reponsables de políticas. En *Calentamiento global de 1.5°*, 26 pp. www.ipcc.ch

Krzyszkowski, D., Stachura, R. (1998). Neotectonically controled fluvial features, Walbrzych Upland, Middle Sudeten Mts, southwestern Poland. *Geomorphology, 22*(1-2):73-91. DOI:10.1016/S0169-555X(97)00040-8

Kumar, A. y Kunte P. (2012). Coastal vulnerability assessment for Chennai, esast coast of India using geospatial techniques. *Natural Hazards*, 64:854-872. DOI: 10.1007/s11069-012-0276-4

Kuzmin, Yu. O. y Fattakhov, E. A. (2022). Analysis of the Time Structure of Strain Processes in the AshgabatFault Zone (Northern Kopet Dag). *Seismic Instruments, 58*(2):148-159. DOI:10.3103/S0747923922020062

Lilienberg, D. A. (1970). Mapa geomorfológico de Cuba escala 1:1 500 000. En *Atlas Nacional de Cuba*. Ed. GUGK, pp. 25-27.

Lilienberg, D. A., Hernández-Santana, J. R., Marques Tablón, M. E., Alvarez Gómez, L. (1993). *Movimientos tectónicos recientes de Cuba. El polígono geodinámico complejo de Santiago de Cuba*. Ed. Academia. T. 1, 453 p.

Liu, C.-W., Lin, W.-S. Shang, C., Liu, S.-H. (2001). The effect of clay dehydration on land subsidence in the Yun-Lin coastal area, Taiwan. *Environmental Geology*, 40:4-5. DOI:10.1007/s002540000193.

Luber Agung Wibowo, Agus Hartoko and Ambariyanto (2015). Land Subsidence Affects Coastal Zone Vulnerability. *Ilmu Kelautan, 20*(3):127-134. DOI: 10.14710/ik.ijms.20.3.127-13

Lugo-Hubp, J. I. e Inbar, M. (eds.) (2002). *Desastres naturales en América Latina*. Fondo de Cultura Económica, México, D. F., 501 pp.

McLaughlin, S. y Cooper, J. A. (2010). A multi-scale coastal vulnerability index: a tool for coastal managers? *Enviromental Hazards*, 3:233-248. DOI: 10.3763/ehaz.2010.0052

Mancera Flores, A., Morales Méndez, D., Saavedra Gallardo, E., Hernández Santana, J. R., Méndez Linares, A. P. (2020). Morfodinámica de las costas septentrionales del estado de Veracruz. Tendencias en las últimas cuatro décadas (1973-2017). *Investigaciones Geográficas*, 103:1-17. DOI: 10.14350/rig.60155.

Mantecón, C. L., Álvarez, J. R., Del Río, J. L. (2017). Conflictos derivados de la erosión costera: responsabilidades estatales. Camet Norte, Partido de Mar Chiquita, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Electrónica del Instituto de Investigaciones Ambrosio L. Gioja*, 18:1-23.

Mazzotti, S., Lambert, A., Van der Kooij, M., Mainville, A. (2009). Impact of anthropogenic subsidence on relative sea-level rise in the Fraser River delta. *Geology, 37*(9):771-774. DOI:10.1130/G25640A.1

Meckel, T. A., U. S. ten Brink, and S. J. Williams (2006). Current subsidence rates due to compaction of Holocene sediments in southern Louisiana. *Geophysical Research Letters*, 33, L11403. DOI:10.1029/2006GL026300

Méndez-Linares, A. P., López-Portillo Guzmán, J. A., Hernández-Santana, J. R., Ortiz- Pérez, M. A., Oropeza-Orozco, O. (2007). *The mangrove communities in the Arroyo Seco deltaic fan, Jalisco, México, and their relation with the geomorphic and physical-geographic zonation*, CATENA, 70:127-142. DOI: 10.1016/j.catena.2006.05.010

Minderhoud, P. S. J., Middelkoop, H., Erkens, G., Stouthamer, E. (2020). Groundwater extraction may drown mega-delta: projections of extraction-induced subsidence and elevation of the Mekong delta for the 21st century. *Enviromental Research Communications*, 2, 01 1005. DOI:10.1088/2515-7620/ab5e21

Morales Méndez, D., Saavedra Gallardo, E., Mancera Flores, A., Hernández Santana, J. R., Méndez Linares, A. P. (2022). Morfodinámica costera: tendencias en las últimas cuatro décadas (1976-2017). En José Ramón Hernández Santana, Ana Patricia Méndez Linares y Alexis Ordaz Hernández (Coords.) *Energía undimotriz en la costa veracruzana, México: una evaluación geólogo-geomorfológica de sitios idóneos para el emplazamiento de prototipos ingenieriles*. CEMIE_O; Universidad Autónoma de Campeche, pp. 157-224. DOI: 10.26359/EPOMEX.CEMIE0220224

Núñez, J. C., Ramos Reyes R., Barba Macías E., Espinoza Tenorio A. y Gama Campillo L. M. (2016). Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México. *Investigaciones Geográficas*, 91:70-85. DOI: 10.14350/rig.50172

Olson, K. R., Suski, C. D. (2021). Mississippi River Delta: Land Subsidence and Coastal Erosión. *Open Journal of Soil Science*, 11:139-163. DOI:10.4236/ojss.2021.113008

Orellana, F., Hormazábal, J., Montalva, G., Moreno, M. (2022). Measuring Coastal

Subsidence after Recent Earthquakes in Chile Central Using SAR Interferometry and GNSS Data. *Remote Sensing*, 14 1611. DOI:10.3390/rs14071611

Ortiz, Pérez, M. A. (1992). Retroceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche-Tabasco. *Investigaciones Geográficas*, 25:7-23. DOI: 10.14350/rig.59011

Palacio Prieto, J. L., Ortiz Pérez, M. A., Garrido Pérez, A. (1999). Cambios morfológicos costeros en Isla del Carmen, Campeche, por el paso del huracán Roxanne. *Investigaciones Geográficas*, 40:48-57.

Palmer, B. J., Van der Elst R., Mackay F., Mather A. A., Smith A. M., Brundy S. C., Theackeray, Z., Leuci R., Parack, O. (2011). Preliminary coastal vulnerability assessment for KwaZulu-Natal, South Africa. *Journal of Coastal Research*, 64:1390-1395. https://www.jstor.org/stable/26482403

Pérez-Flores, M.A., Suárez-Vidal, F., Gallardo-Delgado, L. A., González-Fernández, A., Vázquez, R. (2004). Structural pattern of the Todos Santos Coastal Plain, based on geophysical data. *Ciencias Marinas, 30*(2):349-364. DOI:10.7773/cm.v30i2.180

Pevnev, A. K., Odinev, N. N., Guseva, T. V., Davidenko, Ya., Belokopytov, V. A. (1979). Surface Deformation Over the Garm Geodynamic Polygon. *Developments in Tectonics*, 13:203-209. DOI:10.1016/B978-0-444-41783-1.50038-6.

Portela-Peraza, A. H., Díaz Díaz, J. L., Hernández-Santana, J. R., Magaz-García, A. R. y Blanco-Segundo, P. (1989). *Geomorfología*. En Nuevo Atlas Nacional de Cuba. Ed. Inst. Geogr. Nac. España. P. IV.3.2-3.

Presidencia de la República (2018). *Ley General de Bienes Nacionales*, Diario Oficial de la Federación, México, 19-01-2018. www.dof.gob.mx

Romero-Andrade, R., Trejo-Soto, M. E., Hernández Andrade, D., Bojórquez-Pacheco, N. (2022). Lineament analysis as a seismic precursor: The El Mayor Cucapah earthquake of April 4 2010 (Mw7.2), Baja California, Mexico. *Geodesy and Geodynamics*. DOI:10.1016/j.geog.2022.08.001

SEMARNAT (1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección del Ambiente*. Diario Oficial de la Federación, 9 de enero de 2015 (última reforma). Ciudad de México.

SEMARNAT (2003). Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en materia de ordenamiento ecológico. Diario Oficial de la Federación, 8 de agosto de 2003. México, D. F., pp. 39-58.

Sheffers, A. and Scheffers, S. (2006). Documentation of the Impact of Hurricane Ivan on the Coastline of Bonaire (Netherlands Antilles). *Journal of Coastal Research, 22* (6):1437-1450. DOI:10.2112/05-0535.1

Spiridonov, A. I. (1974). *Cartografía geomorfológica*. Nedra. 182 pp. (en ruso).

Tapia-Gutiérrez, P., (s.f.) *La vulnerabilidad sísmica de las ciudades y el planeamiento urbano*. http://plaza.ufl.edu/ptapia/papers/C-ARQ-VU-v3.pdf

Thieler, E. R. and Hammer-Klose, E. S. (1999). National Assessment of Coastal Variability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the US Atlantic Coast. Woods Hole, MA: United States Geological Survey (UGGS), *Open File Report* 99-593, 1 p.

Walker, R. T., Bezmenov, Y., Begenjev, G., Carolin, S., Dodds, N., Gruetzner, C., Jackson, J. A., Mirzin, R., Mousavi, Z., Rhodes, E. J. (2021). Slip-rate on the Main Köpetdag (Kopeh Dagh) strike-slip fault, Turkmenistan, and the active tectonics of the South Caspian. *Tectonics*, 40:e2021TC006846. DOI:10.1029/2021TC006846.

Warrick, R. A., Le Provost, C., Meier, M. F., Oerlemans, J., Woodworth, P. L. (1996). Changes in sea level. In J. T., Houghton, L. G. Meira Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kuttenberg and K. Maskell (eds) Climate Change 1995: *The Science of Climate Change (Contribution of WCI to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel of Climate Change)*. Cambridge, University Press, Cambridge, pp. 359-405.

Wu, P.C., Wei, M. M., D'Hondt, S. (2022). Subsidence in coastal cities throughout the world observed by InSAR. *Geophysical Research Letters*, 49:e2022GL098477. DOI:10.1029/2022GL098477.

Zamorano Orozco, J. J., Ortiz Pérez, M. A., Ramírez Herrera, M. T., Hernández Santana, J. R. (2000). Meseta de Boniato y Graben de Santiago de Cuba: un enfoque geomorfológico de su desarrollo morfoestructural. *Investigaciones Geográficas,* 41:26-45. DOI:10.14350/rig.59102

Zhou, L., Takashi, O. (2006). DEM analysis on longitudinal and transverse profiles of steep mountainous watersheds. *Geomorphology, 78*(1-2):77-89. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.01.017.

Capítulo 5. Liderazgo en crisis para emergencias mayores o desastres derivados de riesgos geológicos e hídricos

Mario Álvaro Ruiz Velázquez [1]

Introducción

Actualmente los desastres en el mundo se sitúan en una escala sin precedentes. Desde la década de los años 90's han cobrado en promedio 58,000 vidas al año, afectando a 225 millones de personas. Solamente en 2005, 92 mil personas murieron a consecuencia de 150 desastres. Existe evidencia científica que establece que también el calentamiento global incrementa la cantidad e intensidad de las amenazas naturales, tales como inundaciones y tormentas severas (Organización de las Naciones Unidas, 2006: 7).

Los desastres azotan a todos los paises, pero el impacto negativo es aún mayor en aquellos en desarrollo debido, a la falta de recursos financieros o materiales para su sustento y de sus hogares. De los 49 países en vías de desarrollo en el mundo, 24 enfrentan altos niveles de riesgo de desastres; seis de éstos les hacen frente a seis y ocho desastres de gran magnitud anualmente. Para el mundo, durante la última década los desastres ocasionaron daños calculados en un promedio anual de $67 mil MDD. En los años 50, el costo económico relacionado con los desastres que desencadenan las amenazas naturales se ha incrementado, pasando de $3.9 mil MDD a $63 mil MDD. Sólo en el 2005 las pérdidas ascendieron a $220 mil millones; en general, el Banco Mundial afirma que las pérdidas que producen los desastres en los países en desarrollo, en términos del Producto Interno Bruto, son hasta 20 veces mayor que en los países desarrollados (Organización de las Naciones Unidas, 2006: 7, 8).

1 Doctor en Gestión Integral de Riesgos. Instituto de Investigaciones y de Estudios sobre Alertas y Riesgos, A.C.

Bangladesh, es uno de los lugares más asediados por los científicos dedicados a la investigación de desastres, ya que en el planeta ha presentado en los últimos cincuenta años los cambios climáticos más representativos. En este período se presentaron 200 tipos de eventos diversos (tsunamis, sismos, inundaciones, ciclones, tornados, etc.) matando a quinientas mil personas y afectando a más de quinientos millones (Wade, 2008: 1).

México se encuentra situado en una región expuesta a diversos fenómenos naturales, así como fenómenos generados por el hombre que anualmente causan daños, pérdidas económicas y, lamentablemente, pérdidas de vidas humanas. El país se encuentra situado en una zona de alta actividad sísmica y volcánica provocada por el movimiento de 5 placas tectónicas. Por ello dos terceras partes del territorio se encuentran en zonas de alto y muy alto peligro sísmico. De igual manera, por el gran número de volcanes que existen, ya que 14 de ellos se consideran activos pues han hecho erupción en tiempos históricos (Sistema Nacional de Protección Civil, 2006: 13).

La ubicación del país y sus características geográficas favorece la presencia de fenómenos hidrometeorológicos, como los 25 huracanes que en promedio se generan anualmente, afectando principalmente las zonas costeras en ambos litorales. Asociadas a estos fenómenos, son las lluvias torrenciales que provocan inundaciones y procesos de remoción en masa. Por el contrario, algunas regiones del país se ven afectadas por escasez de agua durante tiempos prolongados, dando lugar a sequías. Algunas otras regiones se ven afectadas por sistemas invernales, incendios forestales, marea roja, y actividades humanas relacionadas con la industria y el manejo de materiales peligrosos, que igualmente afectan año con año al país (Sistema Nacional de Protección Civil, 2006: 13); ejemplo de ellos fueron las explosiones de San Juanico y Guadalajara que han dejado en la historia una huella que como desastres nunca se borrarán de las mentes.

Por sus efectos, los desastres presentan importantes consecuencias en el ámbito económico y social, en el desarrollo de una región e inclusive llegar a comprometer la seguridad nacional. Por tanto, su impacto puede incidir significativamente en el bienestar y calidad de vida de la población. Así, en las últimas dos décadas (1980-1999), los efectos causados por los desastres en México significaron, en promedio anual, pérdidas de 500 vidas humanas y daños materiales por 700 MDD (Sistema Nacional de Protección Civil, 2006: 13).

Es imperativo prepararse y protegerse ante esas amenazas. Los avances en ciencia y tecnología están mejorando la habilidad en Estados Unidos para prevenir los peligros provocados por los desastres. Los avances científicos y tecnológicos están siendo aplicados en cada faceta para la reducción del riesgo, incluyendo precisión en los modelos de tormentas, terremotos, y la innovación en técnicas de comunicación para la mitigación de riesgos (National Science and Technology Council, 2003: 1).

Organismos encargados de tomar decisiones en la reducción de riesgo de desastres deben demostrar, ante los eventos de desastre asociados, fenómenos geológicos e hidrometeorológicos la capacidad de toma de decisiones en un entorno incierto o hiperincierto, la urgencia de un pensamiento futuro con sensibilidad en los desastres y gestión integral de riesgos; de planear de forma estratégica involucrar y cuidar del tejido social, en especial las comunidades, pues constituyen una legitimidad con la población, es decir con gobernanza.

Por esta razón ante los desastres los gobiernos tienen que reaccionar adecuadamente mediante una administración y gestión de la crisis, con herramientas que les permitan monitorear y reaccionar ante la latente pérdida de vidas humanas, bienes materiales, así como los bienes culturales y naturales de nuestro planeta.

Algunos de los factores que construyen los desastres asociados a fenómenos geológicos e hidrometeorológicos son cuantitativos, como la magnitud, foco, duración, velocidad del viento, cantidad de lluvia, daños, pérdidas, así como la identificación y cuidado de las afectaciones en las operaciones vitales y estratégicas de ciudades que deben considerarse en un orden igual, cualitativo como la capacidad de reponerse ante un desastre a través del liderazgo comunitario o vecinal; mecanismo gestor eficiente y eficaz para la conformación de la reducción del riesgo de desastre, indicadores etnográficos, así como el propio sentido de pertenecía del territorio.

Por lo anterior, se plantea la siguiente cuestión ¿es suficiente el andamiaje científico tecnológico para una correcta Gestión de Riesgos ante emergencias mayores o desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos y geológicos?; los encargados en la toma de desiciones en una prospectiva fractal de los procesos en gestión de riesgos ¿tienen la capacidad de liderazgo para construir y fortalecer comunitariamente los resultados de la prevención y atención de emergencias mayores o desastres? En el ámbito de las crisis en emergencias mayores y desastres ¿cuáles son las características de un líder que gestione los procesos en prevención, atención y reconstrucción?

1. Antecedentes

El liderazgo en crisis como capacidad humana debe demostrar en las emergencias mayores y desastres, una alta capacidad de decisión, un entorno que varía de lo incierto a lo hiperincierto; de la urgencia de un pensamiento perspectivo hasta uno prospectivo con técnica estratégica resolutiva en el manejo de desastres con gestión integral de riesgos; a su vez, involucrar el tejido social, en especial para construir una legitimidad con la población y, en consecuencia, una gobernanza.

Históricamente el liderazgo ha evolucionado:

- Hace 8 mil años en el medio oriente, con líderes autoritarios y dominantes: Filipo, Aníbal, Cornelio Escipión.
- Los mensajes más profundos en la historia han venido del destierro: Cristo, Mahoma, Buda.
- Richard Nixon: los líderes políticos tienen que inspirar a sus seguidores:

    - Hitler con su fuerza retórica
    - Stalin con poder autoritario
    - Ho Chi Minh, héroe legendario en Vietnam y fuera de sus fronteras.
- Los rasgos personales más citados de Stogdill, Mann, Stgdill, Lod De Vader y Allider, Kirk Patrick y Locke, según Northouse: inteligencia, confianza en sí mismo, determinación, integridad personal, carácter sociable.
- Lasswel: modelo relativamente estable de iniciativa eficaz para la toma de decisiones políticas.
- Tuker: proceso interactivo en el cual algunos individuos ejercen o incitan a realizar una determinada influencia sobre otros.
- Kellerman: el proceso por el que un individuo ejerce de forma sistemática más impacto en la naturaleza y dirección de las actividades de un grupo.
- Blondel: el poder que ejerce uno o más individuos para dirigir a los miembros de la nación a una acción.
- Edinger: una disposición caracterizada por la habilidad que ocupa para guiar el comportamiento colectivo a la dirección de la asignación imperativa de valores deseada en una comunidad.
- Henry Kissinger: el reto histórico para los líderes de hoy es gestionar la crisis al mismo tiempo que construyen el futuro. Su fracaso en esta tarea puede incendiar al mundo.
- Stefan Sweig: luego de haber vivido lo más profundo de los valles se puede apreciar lo magnífico que es ascender a la cumbre de la más alta montaña.
- Weber: el carisma es la gran fuerza revolucionaria de las épocas vinculadas con la tradición.
- Maquiavelo: mientras la relación de autoridad es de subordinación jerárquica, la de liderazgo es de sumisión personalizada.
- Gina Zablodovsky: ante las nuevas perspectivas de la psicología, el héroe tradicional desaparece y el liderazgo ya no se explica en función de una serie de rasgos y atributos físicos, sino que se concibe como resultado de la interacción social, del lugar de la actividad humana

dentro de una determinada estructura, del papel que juegan algunos individuos y de las esperanzas mutuas de líderes y seguidores.
- El líder requiere comunicarse directamente evitando ambiguedades que impida acuerdos. Arjen Boin menciona que el comunicado debe ser honesto y coherente; en condiciones extremas consiste en actuar correctamente sobre el terreno como en desarrollar un relato convincente que sea asumido por el conjunto de la población y permita tomar decisiones difíciles y adoptar medidas traumáticas sin que generen una excesiva resistencia.

Hoy podemos, en esta línea inductiva, decir que el liderazgo se puede resumir en:

- El liderazgo hoy no es dominación, obediencia, poder.
- La influencia del líder en las personas se consigue convenciéndolas no forzándolas a asumir valores y creencias inciertas.
- El líder y los seguidores son dos entidades independientes.
- Gran mujer u hombre más gran país más causa mezclados, hacen surgir verdaderos líderes.
- El líder político gestiona su visión y hace propia o la gente creando conciencia.
- El líder no concentra en sí mismo el poder absoluto.

Como humanos tenemos la inteligencia y el corazón de afrontar la realidad de buscar respuestas con la incertidumbre que las decisiones que se tomen no sean las más acertadas, ocupando métodos del manejo de crisis como: entender el problema, buscar ayuda y coordinar acciones.

Las crisis desconciertan, cierran muchas posibilidades y disminuyen un futuro plausible bueno con falta de información e incapacidad de encontrar una solución inmediata y plena. Asimismo, obligan a la autorevisión, al replanteamiento o creación de nuevas perspectivas; nos indican que se compone de múltiples factores observados en el momento, que manifiestándose a mediano plazo pero siendo inimaginables a largo plazo, pues en todo ese proceso, se debe estar ahí, tomado decisiones y desafiando a cada momento para hundirse o lograr que nazcan las mejores cualidades y capacidades para lograr, en su caso, ser verdaderamente líderes excepcionales.

La pandemia (COVID-19) evidenció que, aun con el conocimiento de preparación y atención en experiencias anteriores más los virus han probado al mundo que no se han implementado sistemas de monitoreo y alerta correctos, que la comunidad científica experta no ha sido suficientemente escuchada en sus aportaciones en el entramado de acciones dentro del marco de la gestión integral de riesgos. La incapacidad ante esta eventualidad en los liderazgos

mundiales en la toma de decisiones; teniendo al inicio de la pandemia, declaraciones desafortunadas de algunos líderes mundiales:

- 30 de enero de 2020. Giuseppe Conte, primer ministro de Italia: "la situación está bajo control".
- 03 de marzo de 2020. Boris Johnson, primer ministro de Reino Unido: "deberíamos seguir con nuestra vida como siempre".
- 10 de marzo 2020. Jair Bolsonaro, presidente de Brasil: "hay mucho de fantasía en el tema del coronavirus" (Gordon, 2020).

La pandemia ha afectado directa o indirectamente todos los habitantes del planeta. Se estima que, hasta ahora, más del 10% de la población mundial ha sido infectada por el nuevo coronavirus. Este promedio esconde el hecho que en muchos lugares de Europa, Estados Unidos, Brasil y México esta proporción podría ser mucho mayor. Con más de 10,000 muertes por semana, el COVID-19 es la tercera causa de muerte a nivel mundial (en México es la principal causa).

No todas las regiones del mundo se han visto afectadas de igual manera. Algunos países se han desempeñado mejor que otros.

En la pandemia se evidenciaron situaciones como las siguientes (González y González Felipe 2021: 4-9):

- Saadia Zahidi, directora gerente del Foro Económico Mundial (WEF) "esta crisis ha sacado a la luz todo un legado de redes de seguridad social erosionadas, modelos laborales precarios y bajos salarios que subrayan la necesidad de equilibrar la distribución de riesgos y beneficios entre la sociedad, los gobiernos y el sector privado".
- Andrew Wilson: La calidad de gobernanza es lo predominante, los Estados bien gobernados proporcionan una eficacia y eficiencia en la información y orientación que permite a la población "comprender" el riesgo y "tomar decisiones" para evitarlo.
- Shlomo Ben-Ami (ex ministro de Asuntos Exteriores de Israel): En Gobiernos Democráticos como Austria, Australia, Corea del Sur, Grecia, Singapur, Taiwán, Nueva Zelanda o Portugal, y Hong Kong "tienen en común que sus líderes reconocieron la escala del desafío, lo comunicaron de manera creíble a sus ciudadanos y actuaron oportunamente. Por el contrario, los Estados con peor desempeño o estaban con la guardia baja (Italia y España) o tuvieron líderes que demoraron las acciones (Brasil, Reino Unido y Estados Unidos).
- Posiblemente las mejores decisiones se han tomado, no sólo en países democráticos, sino en aquellos que además están gobernados por mujeres por su gestión eficaz y el liderazgo honesto, el cual ha resultado

ser más participativo que providencial, más creíble que el culto a la personalidad escenificado por muchos jefes de Estado, construyendo un respaldo en la población derivado de la confianza con acciones como información veraz e involucramiento en su difusión (Jacinta Ardern de Nueva Zelandia, Erna Solber de Noruega, Tsai Ing-wen de Taiwán, Katrin Jacobsdóttir de Islandia, Helle Thorning-Schmidt de Dinamarca y, Angela Merkel de Alemania).

La buena comunicación también es un componente de buena gobernanza y resulta esencial en una crisis. Las personas sólo responderán a las ordenanzas de salud pública si éstas les generan confianza.

2. Liderazgo en crisis (*Crisis Leadership*)

Ante los desastres asociados a fenómenos naturales, los gobiernos tienen que reaccionar adecuadamente mediante una correcta administración de la crisis ya que se tiene latente la pérdida de vidas humanas y bienes materiales, por ende, una pérdida de legitimidad. Existen evidencias para probar la legitimidad en los gobiernos, en específico la administración pública moderna en desastres asociados a la naturaleza: pensar en lo "inconcebible e hiperincierto" es decir, un cambio de paradigma que nos orienta a tratar los desastres provocados por la naturaleza al igual que los actos de terrorismo y revoluciones violentas, ya que por sus efectos son iguales (Ali, 2007: 149).

La "urgencia" es el pensamiento administrativo actual y, a su vez, la falla central en las crisis. Se debe tener un pensamiento del día de mañana con tendencia a ser más duras y complejas las crisis, encarando un mundo más inconcebible, impensable y desconocido como es el calentamiento global (Ali, 2007: 149).

El liderazgo en crisis es un tema poco abordado, desarrollado y puesto en práctica por organizaciones dedicadas a la atención de incidentes derivados de fenómenos perturbadores naturales. El resultado de un mal liderazgo en crisis se ve reflejado en pérdidas humanas y bienes que pudieron haber sido menores o nulos.

El huracán Katrina fue la mega falla en la administración de emergencias. El gobierno encabezó una pobre administración y un pobre liderazgo en la crisis que paralizó las capacidades administrativas y de gobierno (Ali, 2007: 150).

Este hecho tuvo un mayor significado en el país más poderoso puesto a prueba, fallando en ella. Por esta razón, se piensa en caso hipotético de una "desestabilización económica y política mundial debido a que en una misma temporada sucedieron dos o tres Katrinas en Estados Unidos". Queda entonces de manifiesto que los eventos de crisis naturales son semejantes a los

provocados por el hombre, es decir una guerra declarada por la naturaleza a Estado Unidos (la cual podría perder) (Ali, 2007: 154).

Debido a estos cambios repentinos provocados por las crisis, se debe pensar en condiciones complejas, sistemas de manejo en la administración complejos que puedan transformar la lectura del caos y las situaciones de crisis sin observar dinámicas de sorpresa; es decir los "sistemas de administración sorpresa" (Ali, 2007: 150).

Estos sistemas deben ser manejados por un gobierno y política "extraordinarias" demandando un "régimen de gobernanza y administración para emergencias" (Ali, 2007: 151).

La estructura necesaria en las situaciones de emergencias se debe atender con un solo sistema de comando central. Antes de eso, un gobierno basado en el enfoque de emergencias debe tener controlada la crisis para no generar una situación caótica, por ello, al final se puede recuperar la situación, haciendo posible pasar de una etapa de gobierno de emergencia trascendente para aprender de la experiencia (Ali, 2007: 151).

En emergencias militares, la burocracia militar responde con fuerzas especiales a través de una estructura de comando central flexible, pero en eventos sociales y otras emergencias la burocracia es muy lenta para actuar como líder, debiendo ser suplantada por un sistema de comando central que pueda movilizar las fuerzas del gobierno; actuando como organizador de fuerzas voluntarias y asistencia extranjera para contingencias. Los campos de crisis y administración de emergencias han tenido un lento desarrollo, pero en cambio se tiene un camino para alcanzar un nivel intelectual y prácticas maduras, desarrollando productos como el cuerpo del conocimiento en crisis y administración de emergencias "*Body of Knowledge in Crisis and Emergency Management*" (Ali, 2007: 152).

La forma actual de administración nos muestra que los diferentes niveles de gobierno y sus oficiales con diferentes puntos de vista en sus ventajas; una coordinación entre oficiales que atienden las emergencias que impiden a su vez que otros participen en el proceso, la subvaloración de la ayuda en las emergencias en la agenda del gobierno y, finalmente, la lentitud de la operación en la administración de las emergencias (Ali, 2007: 152).

La administración efectiva en las crisis y emergencias, requiere de una planeación y preparación preventiva seria, respuestas a sistemas institucionalizados con una fuerte estructura central de comando, una buena red coordinada de respuesta y sistemas de recuperación; un equipo especializado de administración de crisis con campos de comando descentralizado armados con flexibilidad y presencia de experticia en distintas áreas como en situaciones de crisis (Ali, 2007: 153).

Una de las lecciones aprendidas del caso Katrina, fue la falta de estructura central en comandos con liderazgo y coordinación de los esfuerzos locales y

estatales (mayores fallas durante la crisis); con cientos de redes de organizaciones y voluntarios que fueron incapaces de trabajar juntos de una manera flexible y colaborativa (Ali, 2007: 155).

En las crisis, la composición de silos (grupo de personas aislado de otras áreas) en la organización denota gran fragmentación; afectando cada aspecto de sus operaciones. Se administran las organizaciones como máquinas, sin considerar los manejos de los sistemas extremadamente complejos y gran interacción para los casos de crisis, aislando los departamentos por completo, sin comunicación con sus partes, es decir, se contextualiza que las organizaciones son grandes silos. Mitroff maneja como hilo conductor un mundo basado en un sistema complejo, interconectado e interdependiente (Mitroff 2004: xi).

Se manejan los problemas con una mentalidad en la era de la máquina, la misma que ha creado cientos de problemas por lo cual, no debe ser utilizada para resolverlos. La naturaleza fragmentada de la administración de las crisis se ve directamente reflejada en sus diseños. Muy pocas lecturas dan una panorámica que muestra cómo, dónde y por qué debe ser tratado y embonado en un todo (Mitroff 2004: xii).

Se deben contemplar las crisis que afectan a todos, por lo que necesitamos entender por qué ocurren y qué se puede hacer para disminuir el suceso e impacto, buscando técnicas de recuperación en negocios, debiendo considerar el todo como "un todo coherente". Por ello se debe profundizar en el análisis de las acciones de los actores en un entorno del liderazgo en crisis (Crisis Leadership) (Mitroff 2004: xiii).

La crisis, menciona Mitroff, es sinónimo de Chernobyl, la guerra del golfo, Ford/Firestone, WTC y el Pentágono, Enron y la destrucción del Shuttle Columbia. La organización se integra de gente, tecnología y crisis. La tecnología es diseñada y operada por gente. La gente constituye la organización y, en su conjunto, una organización y gente responsable de introducir los errores, intencionales y no intencionales en la operación de las tecnologías. Las crisis se dan cuando sucede una avería o mal funcionamiento entre gente, organización y tecnología, enfocándose a la primera dupla (Mitroff, 2004: 1).

Mitroff enuncia los aspectos característicos de la gente: la personalidad o estilo de decisiones; cómo manejar y responder a los conflictos y su estado del ego. La caracterización en las gentes es compleja al igual que las organizaciones; se caracterizan por sus políticas y estrategias de negocio, cómo se organiza, su estructura, sus sistemas de recompensa, sus tipos de comunicación y los contenidos y sanciones (Mitroff , 2004: 4, 5).

Los factores que influyen en las crisis son tipos (categorías), mecanismos (sistemas de detección temprana, control de daños y recuperación del negocio), sistemas (estructura de las organizaciones y su afectación en ayudar o inhibirse en las crisis) y los actores interesados (*stakeholders*) (Mitroff, 2004: 4).

Mitroff señala que los riesgos para las crisis en desastres provocados por la naturaleza son los terremotos, los incendios, las inundaciones, las explosiones, los huracanes y los tifones (Mitroff, 2004a: 46).

Existe una diferencia entre el Manejo y/o administración de las Crisis. El enfoque del manejo de la crisis es antes, durante y después de una crisis, creando mecanismos específicos para cada una de estas partes. Un factor fundamental para desvirtuar un liderazgo en crisis, es el enfoque "administración del riesgo". El uso y costumbre de este enfoque es del 85 al 90% en las organizaciones de Estados Unidos, por lo menos en los últimos 20 años. Para el liderazgo de las crisis, se tiene una actitud proactiva y no reactiva. Sin embargo, existe una doble problemática: las empresas no están preparadas para lo que les ha pasado y mucho menos para lo que les podría pasar. Al respecto, no ha habido gran avance, posiblemente nulo, es decir no se asume un rol en lo pensable e impensable (Mitroff, 2004: 10).

La habilidad de pensar críticamente es un paso a lo impensable. La habilidad de estar alerta, de examinar y concebir realmente los retos del mundo actuales de "conectar los puntos" y ver "la gran foto"; ver más allá de lo estructuralmente razonable (Mitroff, 2004: 11).

Tener la oportunidad de rediseñar las instituciones, en el sentido de *crisisleadership*, podría anticipar y prepararse para futuras crisis. La manera convencional de pensar, nos dice que se cuiden todas las partes diseñadas y funcionales. En el pensamiento crítico, es la suma de sus partes individuales. El hecho de que cada parte esté bien diseñada y tenga buen desempeño, no asegura que TODO vaya a funcionar bien (Pensamiento crítico: un sistema complejo puede ser reducido a sus componentes) (Mitroff, 2004: 12).

3. Liderazgo integral

Basado en la teoría integral del liderazgo de Ken Wilber, Thierry C. Pauchant presenta el artículo Liderazgo Integral: una propuesta de investigación (*Integral Leadership: a research proposal*). El liderazgo integral de Wilber analiza, mediante un Modelo de cuatro cuadrantes, dos perspectivas del ser humano, su realidad "interna" y "externa", su entorno "individual" y "colectivo" (Pauchant, 2005: 212).

Wilber define los cuadrantes como A: yo, la realidad vivida por el individuo, la cual se consigue a través de diálogos o estudiando sus escritos privados, discursos. B: su, comprende la realidad de la persona percibida por su propia personalidad por otros. C: sus, se refiere al mundo tangible, cuantificable y medible alrededor de su actuación en una organización, estado o país y su efecto en el ramo específico y D: nosotros, la percepción colectiva del individuo (Pauchant, 2005: 212).

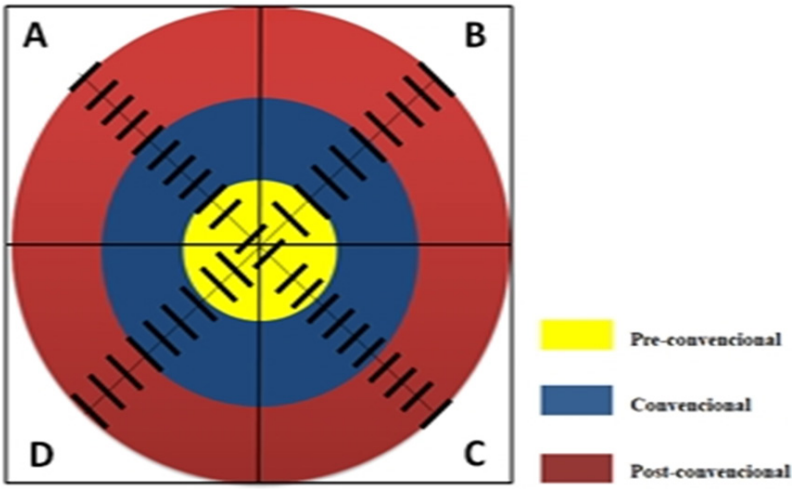
Cuadro 1. Características por cuadrante

	Interior	Exterior
	A "I"	B "IT"
Individual	*Personal meaning and sense of self*	*Body and behaviors*
	D "WE"	C "ITS"
Collective	*Culture and shared Institutions, artefacts,*	*Values systems and processes*

Fuente: Adaptado de Integral leadership: a research proposal. Journal of Organizational Change Management, Pauchant, 2005.

En la actualidad, los estudios y capacitación en liderazgo, se enfatizan en los cuadrantes B y C (externo) y alguna atención al cuadrante D: en el modelo del líder integral se abordan y profundizan el A y D. El modelo integral de liderazgo de Wilber sugiere tres niveles generales, pre-convencional, convencional y post-convencional, siendo este último el enfocado en la investigación del liderazgo en crisis con un énfasis en su comportamiento, racionalidad y efectividad (Pauchant, 2005: 216).

Figura 1. Modelo Integral de Liderazgo



Fuente: Adaptado de Integral leadership: a research proposal. Journal of Organizational Change Management, (p. 216), Pauchant (2005).

En la actualidad, Pauchant ha desarrollado el proyecto de investigación "Lidegrafía" basado en el desarrollo integral de Wilber (*The Leadergraphy Re-*

serch Project on Integral Development). El proyecto busca, en lo general, contribuir a la teoría, práctica, educación y entrenamiento del liderazgo (Pauchant, 2008).

El método que maneja Pauchant inicia con la selección de los líderes a través de los siguientes criterios: 1) Haber tenido un impacto en una gran comunidad durante su vida; 2) Ser admirado por diversas poblaciones; 3) Tener reconocimiento público (Pauchant, 2005: 219).

4. Componentes del liderazgo en crisis para emergencias mayores o desastres derivados de riesgos geológicos e hídricos

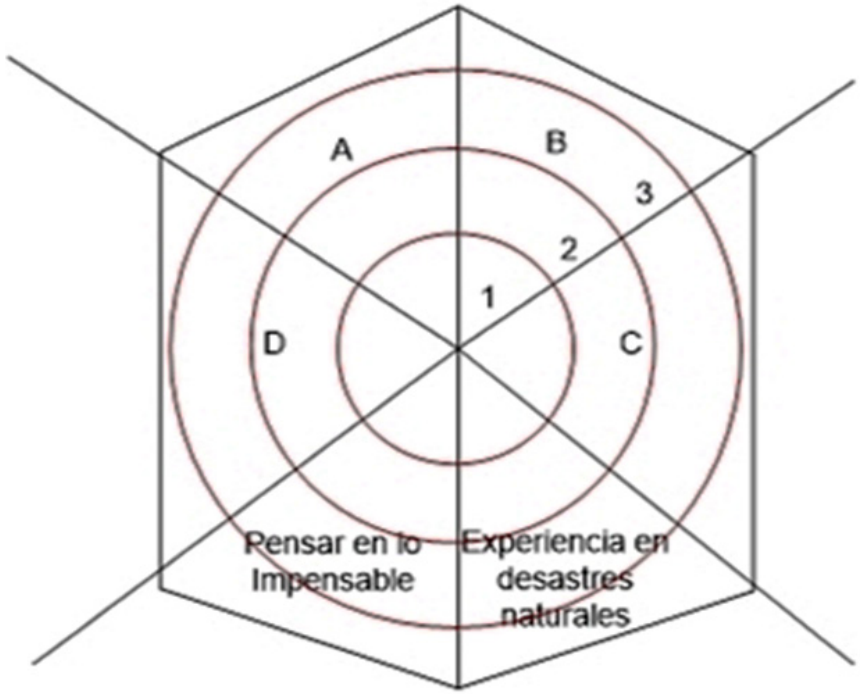
Seguido del análisis del entorno, se establecerá un modelo que caracterice al líder en crisis de emergencias mayores o desastres asociados a la naturaleza; se toman de inicio las variables establecidas en el modelo que serán conforme al modelo de liderazgo integral de Wilber (características del individuo internas y externas en un entorno individual y colectivo) y el método de Pauchant (interpretación biográfica "micro", análisis institucional "meso o intermedio"); la investigación histórica (macro) para seleccionar e investigar a cinco líderes en desastres originados por fenómenos naturales. Asimismo, se integrará el modelo y el método mencionado, dos variables que enfocan la investigación que considera Mitroff, así se toman las cinco características de un líder para dirigir un centro de emergencias mayor o de desastres asociados a la naturaleza, las cuales son:

- Debe pensar en lo impensable.
- Sus acciones deben haber sido juzgadas positivamente.
- Debe tener reconocimiento público.
- Debe haber tenido un impacto importante en una organización o en una comunidad.
- Debe tener experiencia en emergencias mayores o desastres provocados por la naturaleza.

Esto genera un análisis retrospectivo, mediante la selección percibida postconvencional del líder y reconstruir los contenidos y procesos de su liderazgo durante su lapso de vida; utilizando el modelo de Wilbert y el método de Pauchant utilizando instrumentos metodológicos que transiten de lo cualitativo a lo cuantitativo, como las escalas de *Likert Thurstone*.

El enfoque más que se plantea en esta primera parte de características del liderazgo en crisis, es de un líder integral que atienda emergencias mayores o desastres asociados a la naturaleza, basados en el modelo de Wilber y el método de Pauchant. Para tal efecto se construye el siguiente modelo.

Figura 2. Modelo Propio de Caracterización del Líder en Caso de Emergencias Mayores o Desastres asociados a la Naturaleza



Fuente: reproducido The Leaderagraphy Reserch Project on Integral Development, Pauchant, 2008.

La innovación del modelo obedece a integrar dos cuadrantes más al modelo de Wilber y enfocarlo a lo que llama Mitroff "pensar en lo impensable" y a las siguientes capacidades adicionales:

1. El conocimiento de la Gestión de Riesgo de Desastres teniendo como base que:
   - El riesgo es un objeto central inherente al desastre, que en la sociedad deben integrarse esquemas de intervención y acción que permitan reducir su magnitud, teniendo en consecuencia un mejor desarrollo humano (Lavell Allan, 2000: 1).
   - La gestión del riesgo es un proceso que vive la sociedad para influir positivamente en los niveles de riesgo que sufre o podría sufrir, y debe

tomarse como análisis para fortalecer el desarrollo territorial (Lavell Allan, 2000: 2).

- El riesgo es la probabilidad de daños y pérdidas a futuro, del orden físico hasta las naturales, sicosociales y culturales, las cuales tienen como objeto de afectación a los individuos, familias, comunidades, ciudades, infraestructura productiva, etc., por lo que debe analizarse cualitativa, cuantitativa y semicuantitativamente. Principalmente se generalizan a la amenaza y la vulnerabilidad como los principales factores que constituyen el riesgo que, por sus características temporales, debe analizarse en cada cambio de las variables que la construyen, ya que éste puede variar súbitamente y no estar acorde a un análisis del riesgo crítico en la toma de decisiones del líder en crisis (Lavell Allan, 2000: 2).
- Hoy las amenazas a un territorio se pueden concatenar, teniendo amenazas complejas que, independientemente del origen del evento, están construidas socialmente, ya que, si la sociedad no está sujeta a un daño o pérdida, no está amenazada.
- La vulnerabilidad en una sociedad se manifiesta a través de componentes o elementos derivados de un proceso social particular que pueden ser cuantitativos o cualitativos; en interacción mutua es una condición social dinámica y cambiante, las amenazas y vulnerabilidades crean el riesgo a la sociedad, que, según sean sus magnitudes, infieren directamente en la magnitud del riesgo (Lavell Allan, 2000: 3-4).

2. Adicional a ello el líder, debe tener conocimientos en planeación estratégica:

- La planeación obedece a ser holística (identificación de su entorno realista) con la sociedad, identificación de peligros que surjan en el futuro, pensando a futuro, flexible para enfrentarse a contingencias con la identificación de indicadores, procesos y su operación que obedezcan a estas características.
- Ganar la gobernanza: análisis de problemas, análisis de actores, estrategias, actividades.
- Gobernanza del riesgo: enfoque sistémico, basado en los principios de cooperación, participación ciudadana, mitigación de desastres y sostenibilidad, adoptado para lograr una gestión de riesgo más efectiva, complementario de las políticas públicas y de la planificación privada.

Por lo anterior, las características del líder en crisis ante desastres provocados por fenómenos hídricos y geológicos son:

Figura 3. Modelo propio de Características del Liderazgo en Crisis para Emergencias Mayores y Desastres provocados por la naturaleza



Fuente: elaboración propia.

5. Fractalidad dinámica del liderazgo en crisis en la gestión integral del riesgo

Finalmente, las características de un líder en crisis se contextualizan en un entorno operativo con amplia perspectiva y prospectiva en términos fractales de procesos y actores (entiéndase fractalidad como un objeto geométrico cuya estructura básica, fragmentada o aparentemente irregular, se repite a diferentes niveles y escalas) mapeándose de la siguiente manera:

Figura 4. Modelo propio del Entorno Operativo fractal de un Líder en Crisis para Emergencias Mayores y Desastres provocados por la naturaleza



Fuente: elaboración propia.

Pero esta fractalidad debe ser mapeada y operativizada en un entorno dinámico de negociaciones y micro negociaciones entre actores del tejido de la gestión integral de riesgos en la inteligencia de la buena perspectiva y prospectiva de las personas que la integran.

Figura 5. Modelo propio Entorno Dinámico de Negociaciones y Micro Negociaciones de la Gestión Integral de Riesgos



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

- La humanidad ha vivido desastres y no ha aprendido a adaptarse adecuadamente.
- El líder es pieza clave ante la mitigación de riesgos y prevención de desastres.
- Hoy un líder debe ser carismático, con alta sensibilidad en un entorno realista y debe estar preparado para pensar en lo impensable y dejar atrás la administración de la emergencia.
- La aceptación individual, grupal y colectiva es una característica excepcional de líder.
- El líder debe tener conciencia de la construcción del desastre y anticiparse mediante técnicas de análisis, monitoreo, elaboración de umbrales, asimismo en una inteligencia prospectiva de deconstrucción de escenarios futuros plausibles.
- Debe ser un gestor de la planeación estratégica eficiente y eficaz con los recursos disponibles en la inteligencia de reducción de desastres.

- Conocer los tipos de amenazas, regionalizar su análisis, crear modelos basados en centroides de riesgos, donde se apliquen técnicas de monitoreo y alerta de variables que vislumbren un elevado riesgo, se tomen decisiones en un desastre y se visualice a futuro escenarios para su deconstrucción y administración de acciones para que no suceda.
- Pensar en crisis, el cambio de paradigma moderno, integrar el apoyo colectivo a través de las tecnologías y crear apoyo comunitario de todos los participantes en la sociedad, iniciando con el propio gobierno con un alto sentido de gobierno, gobernabilidad y gobernanza.
- Comando de incidentes, centro de operaciones de emergencias, planeación estratégica, pronósticos, inteligencia de riesgos, sistemas de alerta temprana, uso de la ciencia y la tecnología, son técnicas y capacidades que debe tener un líder.
- El líder en crisis debe ser un gestor fiable y convincente.
- El mundo espera la llegada de un nuevo tipo de líderes que, sin importar su extracción social, su situación económica o su condición generacional, impulsen la participación, la cultura del reconocimiento, la integración, la transparencia y el trabajo.
- Las crisis desconciertan, cierran muchas posibilidades y disminuyen un futuro plausible bueno, con falta de información e incapacidad de encontrar una solución inmediata y plena.
- Las crisis obligan a la autorevisión y al replanteamiento o creación de nuevas perspectivas; comprendiendo que se componen de múltiples factores que se observan de momento, manifestándose a mediano plazo e inimaginables a largo plazo que, en todo proceso, se debe estar ahí; tomando decisiones y desafiando a cada momento para hundirse o lograr que nazcan las mejores cualidades y capacidades para lograr, en su caso, ser verdaderamente líderes excepcionales. Por ello, debe ser un líder excepcional.

Bibliografía

Ali Farazmand (2007). Learning from the Katrina Crisis: A Global and International Perspective with Implications for Future Crisis Management. Public Administration Review: Administrative Failure in the Wake of Katrina, 67, 149-159. Extraído: el 24 de marzo de 2008, de *ABI/INFORM Global database*. (Document ID: 1409095471).

González y González Felipe (2021). *Desafíos de la emergencia sanitaria 2020. Universidad Panamericana*. IPADE Buisiness School.

Gordon, C. (Productor Ejecutivo), (2020). *Coronavirus, en pocas palabras [miniserie].* Netflix. https://www.netflix.com/mx/title/81273378.

Lavell Allan (2000). *Sobre la Gestión del Riesgo: Apuntes hacía una Definición*.

Mitroff I. Ian (2004). *Crisis Leadership: Planning for the Unthikable*. New Jersey. John Wiley & Sons

Mitroff I Ian (2004a). Think like a sociopath, act like a saint. The Journal of Business Strategy, 25(5), 42-53. Extraído el 1 de marzo de 2008, de *ABI/INFORM Global database.* (Document ID: 728748541).

National Science y Technology Council (2003). Committee on the Environment and Natural Resources. Reducing Disaster Vulnerability Through Science and Technology. An Interim Report of the Subcommittee on Disaster Reduction. Estados Unidos: *National Science and Technology Council.*

Ruiz Mario (2007). *Propuesta de un Sistema de Alertamiento Temprano para la Ciudad de México*. Tesis para grado de Maestría. Universidad la Salle.

Organización de las Naciones Unidas (2006). *Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres. 2006-2007 Campaña Mundial para la Reducción de Desastres. La reducción de desastres empieza en la escuela*. Estados Unidos: ONU – UNESCO.

Pauchant C Thierry (2005). Integral leadership: a research proposal. Journal of Organizational Change Management, 18(3), 211-229. Extraído el 1 de marzo de 2088, de *ABI/INFORM Global database*. (Document ID: 872190311).

Pauchant C Thierry (2008). The Leaderagraphy Reserch Project on Integral Development. *HEC Montreal*, http://web.hEcuaciónca/leadergraphies/

Sistema Nacional de Protección Civil (2006). *Centro Nacional de Prevención de Desastres. Guía básica para la elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos.* 1ª edición, noviembre 2006. México: Sistema Nacional de Protección Civil.

Wade Jared (2008). Slow and Steady in Bangladesh. *Risk Management*. 55. de ABI/INFORM Global database.

Capítulo 6. Identificación de los factores subyacentes de la vulnerabilidad institucional: una reflexión sobre los procesos generadores de riesgo a escala local. Municipio de Santander de Quilichao, Cauca, Colombia

David Alejandro Muñoz [1]
José Emilio Baro Suarez [2]

Introducción

A nivel internacional, el *International Strategy for Disaster Reduction* (2009) "realiza una reflexión sobre los procesos generadores de riesgo, identificando factores globales y factores subyacentes del riesgo", es decir, en muchos casos la amenaza, exposición y vulnerabilidad están configurados de manera simultánea por los factores subyacentes del riesgo (Baró Suarez y Monroy Gaytán, 2018).

El estudio del riesgo implica entonces la identificación de áreas afectadas, características socioeconómicas y demográficas; información macroeconómica, censos y estadísticas, empleo, entre otras. En este sentido, desde la vulnerabilidad institucional, es necesario establecer los atributos que permiten una clasificación de los daños tanto tangibles como intangibles de esta manera evaluar y analizar las distintas vulnerabilidades tales como: social, socioeconómica, ambiental, física y estructural. De igual manera es importante cono-

1 Magister en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

2 Doctor en Geografía. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

cer la capacidad de respuesta del socioecosistema, la estimación de aquellos procesos que generan ausencia en la planificación del territorio que impactan en este caso, en conflictos por el uso del suelo. Las sociedades representan en este sentido una dimensión propicia de estudio, pero sin desdibujar el papel importante que recae sobre los determinantes de los bienes y servicios ambientales (DARA, 2011).

Entender la gestión integrada del riesgo (GIR), implica aterrizar los protocolos metodológicos que relacionan un estudio en las líneas de tiempo, las cuales han generado eventos de riesgo que, a su vez, se convierten en un proceso histórico donde se deben analizan los factores subyacentes ante fenómenos como inundación, y movimientos gravitacionales. Por otro lado, la caracterización del territorio desempeña un aspecto clave para la construcción de escenarios de riesgo, de esta manera, logra obtener insumos cartográficos que llegan hacer en algunos casos, a la aceptación social del riesgo. Algunas de las estrategias o decisiones al respecto, inciden en la modificación de usos del suelo, en los patrones de deforestación, en el aumento de la escorrentía o en una mayor sedimentación de determinadas áreas. Es necesario anteponer una planeación estratégica frente al riesgo, por ello algunos autores como Altez (2009) refieren a la construcción social del riesgo como "propicia por determinados y cambiantes procesos sociales derivados en gran parte de los estilos y modelos de desarrollo; procesos de transformación social y económica en general". Para Colombia la gestión del riesgo se constituye en:

> *Una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo, por tanto, está intrínsecamente asociada con la planificación del desarrollo seguro, la gestión ambiental territorial sostenible, en todos los niveles de gobierno y la efectiva participación de la población (Congreso de la República, 2012, Ley 1523, Artículo 1).*

Al considerar en este estudio los factores subyacentes de la vulnerabilidad en el contexto de la gestión del riesgo, es necesario comprender que, desde un enfoque de cambio climático, se requiere un plan de gestión de adaptación local teniendo como base los bienes y servicios ecosistémicos y su relación con la comunidad, para garantizar un diagnóstico situacional del territorio. En los últimos 30 años, Colombia ha experimentado una serie de desastres asociados a la variedad de su clima, a causa de los cambios en la temperatura y los patrones de precipitación. Por ejemplo, en el último siglo, medio millón de familias se han visto afectadas por estos deslizamientos causados principalmente por fuertes lluvias en la región Andina (Thuro *et al.*, 2020). El fenómeno cálido ENOS de 1997-1998 contribuyó al incremento en la intensidad de las sequías del país, provocando fuertes afecciones a más de 100,000 personas: sufriendo el abastecimiento de agua en diversos municipios por déficit del recurso, re-

ducción en la producción agrícola, problemas en la cobertura energética, entre otros (Busby *et al*., 2014).

Ante este contexto, el municipio de Santander de Quilichao es centro de su territorio, la Reserva Natural Cerro Munchique-Los Tigres, tiene gran importancia ambiental y características especiales como lugar del último relicto de bosque en el Norte del Departamento del Cauca y su potencial hídrico como principal ecosistema de la cuenca río Quilichao. Por lo tanto, las estrategias de conservación por parte del municipio de Santander de Quilichao, desarrollan un papel central para la cuenca que presenta un rango altitudinal entre 1690 a 2550 msnm donde, de acuerdo con la clasificación de Caldas-Lang, se reconocen dos pisos bioclimáticos a saber: el templado húmedo y frío húmedo. Además, presenta una temperatura promedio de 18°C y una pluviosidad promedio de 2000 mm/año, la cual, según Holdridge, se clasifica como un Bosque Húmedo Premontano (bh-PM). Este tipo de bosque perteneciente a la reserva, protege la cuenca, es considerado como reserva estratégica, ya que al estar conformado por la cuenca del Río Quilichao, humedales y manantiales, cuenta con un gran número de arroyos que tributan sus aguas al Río Quilichao y a su vez al Río Cauca. También cabe resaltar, que el 90% de área boscosa es propiedad pública adquirida por el Municipio a través de Emquilichao, donde estas entidades para lograr mantener las actividades de control, establecieron un convenio de contraprestación mutuo, en el cual la comunidad presta su servicio para las diferentes actividades como la vigilancia y reforestación de las áreas de protección; dando como resultado un mejor control y calidad del agua de la cuenca.

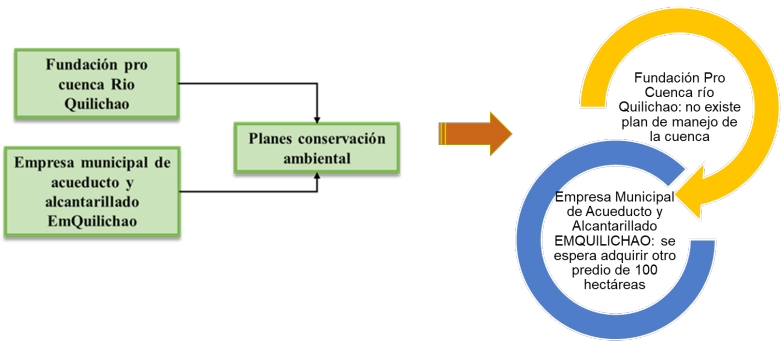
El escenario actual establece al estado legal como reserva municipal Munchique-Los Tigres (en consultas realizadas a Parque Nacionales Naturales de Colombia (PNN)), no se encuentra catalogada en el Registro Único Nacional de áreas protegidas (RUNAP), lo que evidencia la necesidad urgente que este espacio natural forme parte del Sistema Regional de Áreas Protegidas (SIRAP) y de la Unidad Administrativa Especial de la Unidad de Parques Nacionales Naturales (UAESPNN). Ante los crecientes procesos de metropolización municipal, la presencia de parques industriales, el uso de suelos de protección convertidos en uso de expansión, está acelerando un crecimiento poblacional y con ello la llegada de población flotante; la presencia de asentamientos urbanos de desarrollo incompleto, ubicado en zonas de exposición a riesgos, lo que hace en este caso más vulnerables las comunidades asentadas.

Es imperativo entonces, un proceso de organización y planificación del territorio a escala local en el municipio de Santander de Quilichao, el cual deberá estar enmarcado con las dimensiones prioritarias que, al ser analizadas, permitirán identificar parámetros hidrodinámicos de percepción del riesgo, tipos del suelo, movimientos de rocas, geología del territorio, capacidad del

recurso humano, financiamiento y disponibilidad presupuestaría para configurar metodológicamente la vulnerabilidad institucional.

A continuación, se ilustran algunas dimensiones a considerar con la información disponible que configura una matriz de presencia y/o ausencia de variables a analizar (Cuadro 1, 2, 3 y 4 y Figura 1).

Figura 1. Entidades relacionadas con el recurso hídrico municipal.



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 1. Estado de las vías del municipio

Vías	km	Pavimentadas	% Vías pavimentadas	Conformadas o afirmadas
Urbanas	78.3	52	66.4	26
Rurales	353	10	2.8	343.4
Mondomo	7.53	5.06	67.2	2.5
Total	438.83	67.06		371.9

Fuente: Plan municipal para la gestión del riego de desastres, Santander de Quilichao-Cauca, 2016.

Cuadro 2. Cobertura del servicio de energía eléctrica

Resumen	2010	2011	2012	2013	2014
Usuarios rurales	9,223.00	10,265.00	10,590.00	11,371.00	11,923.00
Usuarios urbanos	15,339.00	16,215.00	16,821.00	17,541.00	18,464.00
Usuarios totales	24,562.00	26,480.00	27,411.00	28,912.00	30,387.00
Cobertura rural (%)	-	-	90.06	-	-
Cobertura urbana (%)	-	-	100	-	-
Cobertura total (%)	-	-	95.74	-	93.81
Consumo promedio residencial (kwh)	256.6	1,250.10	6,025.90	-	-
Consumo promedio rural (kwh)	758,441.50	889,518.08	1,144,979.92	1,300,565.00	1,423,401.00
Consumo promedio urbano (kwh)	2,678,946.80	2,822,206.00	2,640,945.50	2,686,474.00	2,603,500.00
Longitud de media tensión	-	-	-	670.85	529.29
Longitud en baja tensión	-	-	-	656.61	670.59

Fuente: Plan municipal para la gestión del riego de desastres, Santander de Quilichao-Cauca, 2016.

Cuadro 3. Organización comunitaria del municipio

Organizaciones	Número
JUNTAS DE ACCION COMUNAL RURALES	104
JUNTAS DE ACCION COMUNAL URBANAS	45
COMITES DE CONTROL SOCIAL DE SERVICIOS PUBLICOS	5
ASOCIACION DE JUNTAS	1
CONSEJO TERRITORIAL DE PLANEACION	1
ORGANIZACIÓN SOCIAL AFROQUILICHAGUEÑAS	10
CONSEJOS COMUNITARIOS	4
CABILDOS INDIGENAS	4
CABILDO URBANO	1
GRUPOS JUVENILES	5

Fuente: Plan municipal para la gestión del riego de desastres, Santander de Quilichao-Cauca, 2016.

Cuadro 4. Cobertura en el servicio de salud. Personas afiliadas al régimen subsidiado y régimen contributivo

Resumen	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Afiliados Régimen Contributivo	32,178.00	1,148.00	34,523.00	998	34,871.00	35,641.00	36,116.00	36,604.00	37,476.00
Cobertura Régimen Contributivo (%)	39.5	1.4	41.1	1.2	40.3	40.6	40.5	40.4	40.7
Afiliados Régimen Subsidiado	13,105.00	4	38,029.00	3	79,401.00	52,675.00	55,500.00	56,900.00	59,422.00
Cobertura Régimen Subsidiado (%)	16.1	0	45.3	0	91.8	60	62.2	62.8	64.5
Total afiliados	45,283.00	1,152.00	72,552.00	1,001.00	114,272.00	88,316.00	91,616.00	93,504.00	96,898.00
Cobertura General (%)	55.6	1.4	86.4	1.2	132.1	100.5	102.6	103.1	105.2
Estimación de DANE	81,506.00	82,697.00	83,938.00	85,197.00	86,502.00	87,872.00	89,267.00	90,682.00	92,114.00

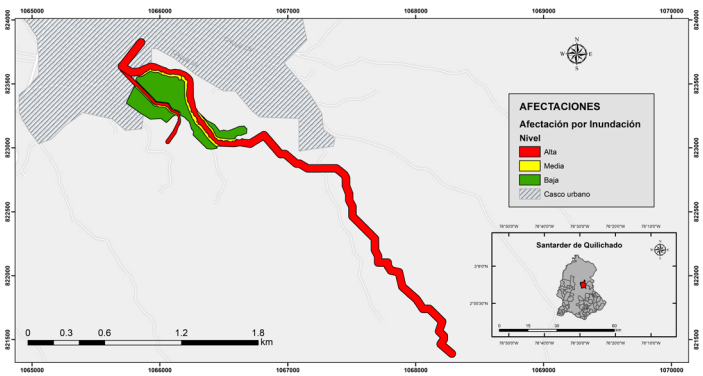
Fuente: Plan municipal para la gestión del riego de desastres, Santander de Quilichao-Cauca, 2016.

1. Aspectos socioeconómicos

Aspectos socioeconómicos

El municipio de Santander de Quilichao es un territorio de confluencia con varios metabolismos, urbanos como rurales. Debido a los procesos de metropolización y expansión ha traído consigo la llegada a la población en situación de vulnerabilidad, esta realidad. Máxima atención por estos asentamientos que convierten los elementos expuestos y ocupa territorios susceptibles ante eventos de origen natural (Figura 2).

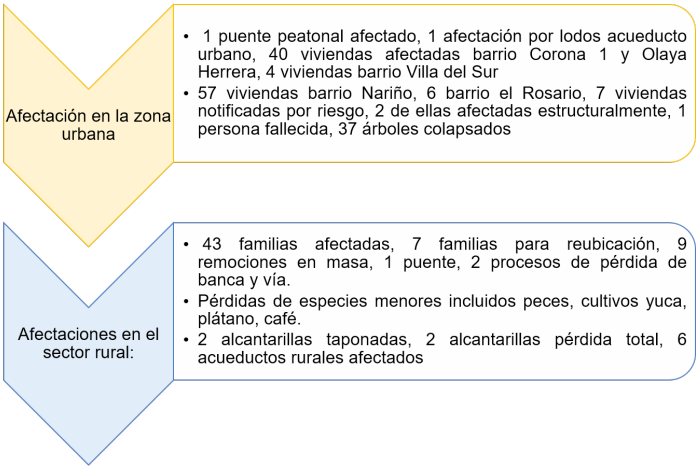
Figura 2. Mapa de afectaciones por inundación ante avenida torrencial, Santander de Quilichao, 2023



Fuente: Elaboración propia.

La avenida torrencial ocurrida el pasado mes de marzo (2023) encendió las alarmas para prestar máxima atención a estos eventos de riesgo y que han puesto en alerta a las entidades del gobierno municipal; propiciando creación de información mediante informes y visitas técnicas a las comunidades más afectadas, en su mayoría, la zona rural del municipio: parte alta de la reserva natural Munchique los Tigres, lugar donde se encuentra la cuenca del río Quilichao (Figura 3).

Figura 3. Inventario de afectaciones por la avenida torrencial, Santander de Quilichao, 2023



Fuente: Magazin CNC, 2023.

Un estudio realizado en el año 2016 por parte de la oficina para la gestión del riesgo de desastres del municipio, arrojó resultados preocupantes para conocer el impacto del indicador en las necesidades básicas insatisfechas (NBI), las cuales fueron contrastadas con valores que corresponden a escala Colombia y del departamento del Cauca (Cuadro 5).

Al comparar la situación actual del municipio con respecto a la gestión del riesgo, es de suma importancia establecer una evaluación de riesgos que contribuya a la reducción de la vulnerabilidad que permita a las comunidades y sistemas ambientales más expuestos, poder lograr una aplicación de estrategias y acciones que implique la generación de información confiable para la construcción y focalización de planes de emergencia para gestar procesos de financiación enfocados a la atención y recuperación ante este desastre.

Otro aspecto clave, es la evaluación de daños esperados lo cual, permite pronosticar los sucesos que podrían ocurrir ante escenarios de cambio climático como lluvia intensa, sequías extremas que ayuden a determinar así el

impacto socioeconómico por eventos de origen natural y exacerbados por acciones antrópicas.

Cuadro 5. Porcentaje de necesidades básicas insatisfechas (NBI) 2010.

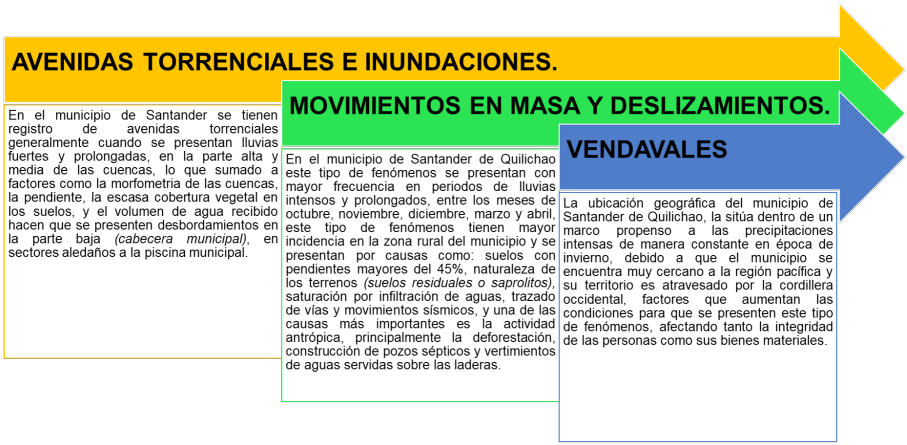
Sector	Santander de Q.	Cauca	Nación
Cabecera	14.01%	24.27%	19.64%
Resto	53.54%	61.75%	53.51%
Total	33.60%	46.61%	27.78%

Fuente: Plan municipal para la gestión del riego de desastres, Santander de Quilichao-Cauca, 2016.

En este sentido, se abordan en el siguiente apartado la consolidación y prioridad de escenarios de riesgo a escala local en Santander de Quilichao, Cauca, Colombia (Figura 4, 5 y 6 y Cuadro 6).

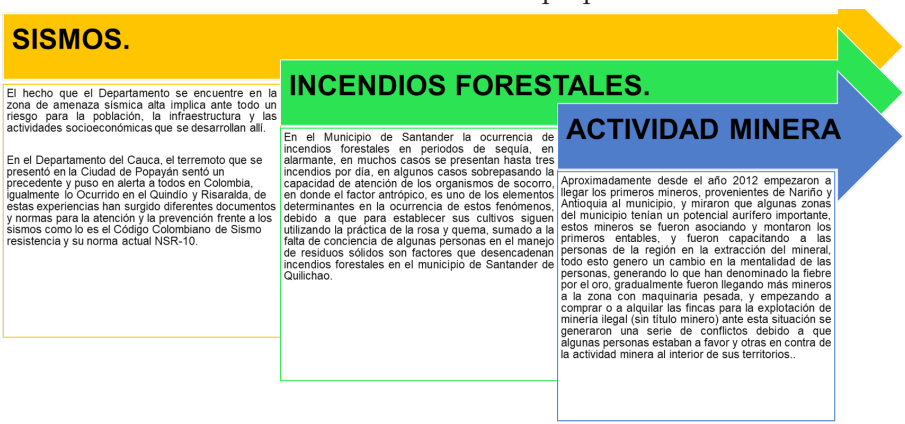
2. Consolidación y priorización de escenarios de riesgo

Figura 4. Descripción de avenidas torrenciales e inundaciones, movimientos en masa, deslizamientos y vendavales.



Fuente elaboración propia.

Figura 5. Descripción de sismos, incendios forestales y actividad minera
Fuente elaboración propia.



Fuente elaboración propia.

Cuadro 6. Análisis a futuro e identificación de medidas de intervención del escenario de riesgo.

ANÁLISIS A FUTURO E IDENTIFICACIÓN DE MEDIDAS DE INTERVENCIÓN DEL ESCENARIO DE RIESGO	
ANÁLISIS A FUTURO	
(Reflexión y discusión acerca de: a)Interacción entre amenaza y vulnerabilidad, cómo están relacionadas en este escenario; b) Posibilidades de reducción de uno o los dos factores, identificación de la posibilidad real de intervenir las condiciones de amenaza y de vulnerabilidad, reflexionar bajo el enfoque "qué pasa si" se interviene un solo factor o los dos, es decir imaginar cómo se modifica el escenario al reducir uno u otro factor; c) Evolución (futuro) del escenario en el caso de no hacer nada).	
MEDIDAS DE CONOCIMIENTO DEL RIESGO	
Identificación de medidas tendientes a conocer de la manera más detallada posible las condiciones de riesgo de este escenario, así como la identificación, especificación y diseño de las medidas de intervención destinadas a reducir el riesgo y a prepararse para la respuesta a emergencias y recuperación.	
Estudios de análisis del riesgo:	**Sistemas de monitoreo:**
a) Análisis detallado de las condiciones de amenaza y vulnerabilidad en el área urbana del municipio de Santander de Quilichao por avenidas torrenciales e inundaciones. b) Evaluación del riesgo de la avenida torrencial, teniendo en cuenta de manera prioritaria los siguientes afluentes: los Ríos Quilichao, Quinamayo, La Teta, la quebrada Antolina. c) Elaboración de mapas detallados de amenaza, por inundación y avenidas torrenciales a escala 1:10.000 para el área rural y 1:5000 para el área urbana.	a) Implementar sistemas de monitoreo por parte de la comunidad a los lugares con mayor propensión a inundaciones y avenidas torrenciales. b) Realizar censos de manera periódica que permita conocer el número de personas y/o familias en condición de amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales.
3.2.3. Medidas especiales para la comunicación del riesgo:	
a) Realizar campañas de educación ambiental y gestión del riesgo de desastres en instituciones educativas y con población en general, orientadas a conocer los factores causales de las inundaciones.	a) Divulgación por medio de emisoras comunitarias, perifoneo, voz a voz. Implementación de sistemas de comunicación
b) Dar a conocer mediante cartillas pedagógicas, para dar a conocer prácticas agrícolas sostenibles.	

(continúa)

MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO – INTERVENCIÓN CORRECTIVA (riesgo actual)		
Medidas tendientes a reducir o controlar las condiciones actuales de riesgo, es decir medidas correctivas o compensatorias. Su identificación se basa en la consideración de las causas anteriormente descritas y el análisis prospectivo (a futuro). Identificar el mayor número posible de medidas alternativas.		
	Medidas estructurales	**Medidas no estructurales**
Medidas de reducción de la amenaza:	a) Implementar programas de reforestación con especies endémicas en la parte alta y media de las cuencas hidrográficas y nacederos de agua. b) Construcción de obras de ingeniería tales como muros de contención, gaviones, muros anclados, pilotes y anclajes en roca, revestimiento flexible con malla entre otros. c) Mantenimiento de las obras para la mitigación del riesgo de inundación por avenida torrencial existentes en el municipio. d) Construcción de obras de arte de aguas superficiales tales como: cunetas, canales revestidos, Bateas, Alcantarillas, Divisorios de agua, revegetalización, entre otros. e) Realizar la recuperación de la morfología fluvial de los principales drenajes que presentan amenaza alta por avenidas torrenciales.	a) Implementar programas de asistencia técnica en prácticas agrícolas sostenibles. b) Realizar capacitaciones tendientes a dar a conocer diferentes obras de bioingeniería para el manejo de la erosión y fenómenos de remoción en masa. c) Seguimiento permanente a los sitios que presentan mayor propensión a fenómenos de remoción en masa. d) Diseñar e implementar el Sistema de Alertas Tempranas. e) Vigilancia y control a los proyectos nuevos de vivienda por parte de la Secretaría de Infraestructura. f) Realizar limpieza a las recámaras del alcantarillado en el área urbana y principales centros poblados.
ANÁLISIS A FUTUROS E IDENTIFICACIÓN DE MEDIDAS DE INTERVENCIÓN DEL ESCENARIO DE RIESGO		
	Presentan amenazas altas por avenidas torrenciales.	Urbana y principales centros poblados.
Medidas de reducción de la vulnerabilidad:	a) Reubicación de viviendas, se encuentran en condición de riesgo.	b) Realizar los estudios de prefactibilidad para la reubicación de viviendas, equipamientos colectivos en condición de riesgo por inundaciones. c) Fortalecimiento e inclusión de los esquemas de vacunación en niños, jóvenes y adultos en zonas de alto riesgo de inundación.

(Continúa)

ANÁLISIS A FUTUROS E IDENTIFICACIÓN DE MEDIDAS DE INTERVENCIÓN DEL ESCENARIO DE RIESGO	
Medidas de reducción de la vulnerabilidad	d) Realizar talleres de capacitación orientados a dar a conocer las condiciones de amenaza, vulnerabilidad que se presentan en la zona. e) Fortalecimiento del recurso humano de la red hospitalaria y diseño de planes hospitalarios en las ESE y las IPS del municipio de Santander de Quilichao.
Medidas de efecto conjunto sobre amenaza y vulnerabilidad.	Capacitación a las comunidades en el conocimiento de la amenaza, condiciones de vulnerabilidad, y preparación para una situación de emergencia.
Otras medidas:	

MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO - INTERVENCIÓN PROSPECTIVA (riesgo futuro)		
Medidas tendientes a evitar que a partir de la situación actual el escenario de riesgo aparezca y/o crezca tanto en extensión territorial como en magnitud, es decir medidas preventivas del riesgo. La identificación de estas medidas se hace considerando las causas anteriormente descritas y el análisis prospectivo. En cada grupo de medidas se consideran de manera diferenciada medidas que atacan las causas de fondo y medidas que atacan las causas inmediatas que pueden hacer que las condiciones de riesgo crezcan.		
	Medidas estructurales	**Medidas no estructurales**
Medidas de reducción de la amenaza:	a) Implementar programas de reforestación con especies endémicas en la parte alta y media de las cuencas hidrográficas, nacederos de agua, y lugares donde se presentan inundaciones. b) Construcción de obras de bioingeniería tales como; Bermas, o rellenos de contrapeso, barreras flexibles, trincheras estabilizantes, taraceo, remoción y reemplazo de material entre otras. c) Construcción y mantenimiento a obras de arte de aguas superficiales tales como: cunetas, canales revestidos, Bateas, Alcantarillas, Divisorios de agua, revegetalización, entre otros.	a) Reglamentación desde el nivel municipal la actividad minera. b) Realizar de manera periódica campañas de educación ambiental sobre el manejo y disposición de aguas servidas, y residuos sólidos. c) Realizar talleres de capacitación orientadas a dar a conocer las condiciones de amenaza y riesgo a los que están expuestos. d) Seguimiento permanente a los lugares que presentan mayor propensión a fenómenos de remoción en masa.

(continúa)

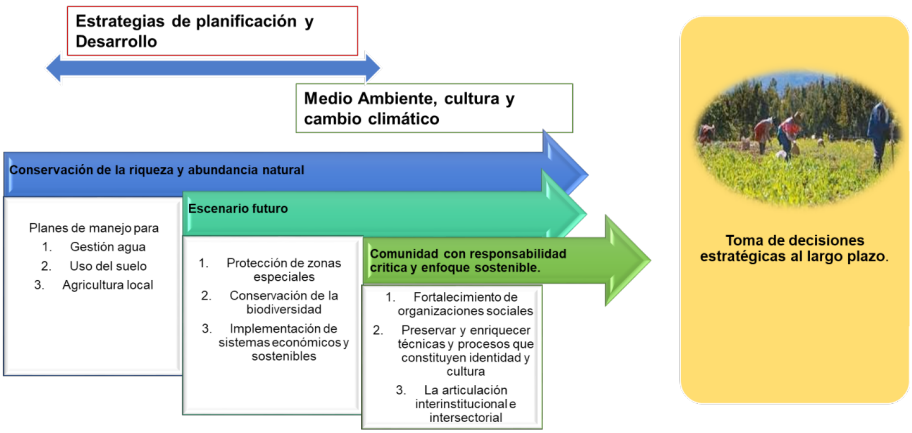
Medidas de reducción de la vulnerabilidad:	a) Reubicación de viviendas, bienes colectivos que se encuentran en condición de riesgo.	a) Realización de estudios de factibilidad que permitan determinar la viabilidad de proyectos de inversión tales como equipamientos de educación, salud, vivienda entre otros. b) Realización de talleres comunitarios orientados a la preparación para la respuesta ante situaciones de emergencias.
Medidas de efecto conjunto sobre amenaza y vulnerabilidad.		
ANÁLISIS A FUTURO E IDENTIFICACIÓN DE MEDIDAS DE INTERVENCIÓN DEL ESCENARIO DE RIESGO		
MEDIDAS DE REDUCCIÓN DEL RIESGO - PROTECCIÓN FINANCIERA		
Medidas tendientes a compensar la pérdida económica por medio de mecanismos de seguros u otros mecanismos de reserva para la compensación económica. Identificación de elementos expuestos asegurables.		
a) Identificar mediante un inventario las instituciones públicas que no se encuentran aseguradas. b) Presupuestar seguros. c) Asegurar las instituciones que no estén aseguradas		
MEDIDAS PARA EL MANEJO DEL DESASTRE		
Identificación de requerimientos específicos de preparación para la respuesta y para la recuperación, derivados del presente escenario de riesgo.		
Medidas de preparación para la respuesta: *(Identificación de requerimientos específicos de preparación para la respuesta derivados del presente escenario de riesgo).*		
Realizar aprehensión de los principios y normas universales de respuesta humanitaria. Contribuir en los procesos de socialización y conocimiento por parte de las entidades para la prevención y mitigación de desastres. Seguimiento del componente de manejo de desastres. Generación permanente de información		**a) Preparación para la coordinación:** • Formular la estrategia municipal de respuesta a emergencias EMRE • Definir el protocolo de actuación de las instancias de dirección • Alistamiento organizacional interno para la respuesta • Identificar fuentes de financiación • Identificar necesidades, recursos, y presupuesto para la respuesta de acuerdo con la magnitud del evento • Consolidación de planes sectoriales • Activación de la sala de crisis • Activación de los protocolos de actuación definidos en la EMRE • Despliegue de la respuesta dependiendo de la magnitud del evento

(continúa)

MEDIDAS PARA EL MANEJO DEL DESASTRE	
	b) Sistemas de Alerta Temprana: Monitoreo permanente por medio de las comunidades a los sitios con mayor propensión a fenómenos de remoción en masa. **c) Capacitación:** Formación en levantamiento de censos y EDAN **d) Equipamiento:** Actualización del inventario de capacidades institucionales *(recursos físicos, y humanos a nivel técnico, operativo y administrativos).* Alistamiento de inventario de capacidades institucionales **e) Albergues y centros de reserva:** ▪ Alistamiento y activación de los alojamientos temporales ▪ Realizar la evacuación de las personas damnificadas dependiendo de la magnitud. ▪ Activación de los centros de reserva ▪ Coordinación interinstitucional de la asistencia humanitaria de emergencia **f) Entrenamiento:** ▪ Talleres de resistencia y sobrevivencia ▪ Taller de primeros auxilios avanzados
Medidas de preparación para la recuperación: *(Identificación de requerimientos específicos de preparación para la recuperación derivados del presente escenario de riesgo).*	
Coordinación interinstitucional con diferentes estamentos de competencia de la gestión del riesgo de desastres.	

Nota. Plan municipal para la gestión del riesgo de desastres Santander de Quilichao – Cauca, 2016. Plan de emergencia y contingencia para el manejo de desastres y emergencias asociadas a la prestación de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado en el Municipio de Santander de Quilichao, Cauca. Ola Invernal, 2017.

Figura 6. Protocolo de estrategias de planificación y desarrollo para el medio ambiente, cultura y cambio climático para la toma de decisiones



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

- Finalmente, para poder realizar un análisis de los factores subyacentes del riesgo es necesario identificar los cambios naturales y las acciones de los procesos antrópicos, que representan en este caso patrones en las distintas escalas, globales, nacionales, regionales y locales.
- Por otro lado, para poder realizar una evaluación del riesgo, se requiere estudiar los factores relacionados con la peligrosidad, vulnerabilidad y exposición. La información construida debe ser aterrizada al conocimiento ciudadano.
- En el marco del cambio climático, los pronósticos para el municipio de Santander de Quilichao exponen una serie de eventos que estarán relacionados con los patrones climáticos de precipitación y temperatura. En este caso, será necesario un enfoque de ecosistemas, comunidad y riesgo que permita la generación de herramientas o metodologías estratégicas derivadas de la gestión integrada del riesgo.
- Asimismo, la importancia ambiental que tiene la cuenca del río Quilichao, por ser parte del territorio de la reserva natural Munchique Los Tigres, reviste importancia por el aprovisionamiento de bienes y servicios ambientales, pero los tensores presentes en la zona hacen vulnerable por la condición de bosque húmedo pre-montano; es decir, con presencia de suelos jóvenes y adicional a ello, por tener el último relicto de bosque del departamento del Cauca, su cuidado es de especial atención.

- Los eventos extremos podrían estar relacionados con la geología y el clima de la zona, por lo tanto, los movimientos gravitacionales estarán presentes durante los períodos de lluvia, aunado a la ausencia de una gestión de adaptación en torno a medidas estructurales y no estructurales.
- La situación actual del municipio, después de la avenida torrencial del pasado mes de marzo del presente año, ha suscitado una mesa de trabajo técnico y científico que requiere de máxima atención para el futuro de la planificación territorial. Por ello es importante la construcción de planes en los diferentes sistemas ambientales, como lo es el caso de la reserva natural Munchique los Tigres y la cuenca del río Quilichao.

Bibliografía

Altez, R. (2009). Ciclos y sistemas versus procesos: Aportes para una discusión con el enfoque funcionalista sobre el riesgo. *Desacatos*, 30, 111-128. https://www.redalyc.org/pdf/139/13911560008.pdf

Baró Suarez, J. E. y Monroy Gaytán, F. (Coordinadores) (2018). *Enfrentando los riesgos socionaturales* (1.a ed.). Clave editorial. http://hdl.handle.net/20.500.11799/95387

Busby, J. W., Cook, K. H., Vizy, E. K., Smith, T. G., y Bekalo, M. (2014). Identifying hot spots of security vulnerability associated with climate change in Africa. *Climatic Change*, 124(4), 717-731. https://doi.org/10.1007/s10584-014-1142-z

Congreso de la República. (2012). *Ley 1523 de 2012, por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial 48411 de abril 24 de 2012. https://www.cornare.gov.co/residuos/rcd/ley-1523-de-2012.pdf

DARA (2011). *Índice de reducción del riesgo: Análisis de capacidades y condiciones. Costa Rica, El Salvador, Guatemala, Honduras, Nicaragua, Panamá y República Dominicana*. DARA. https://tinyurl.com/23nakcas

International Strategy for Disaster Reduction (2009). 2009 *Global Assessment Report on Disaster Risk. Reduction and poverty in a changing climate: Invest today for a safer tomorrow*. United Nations. https://digitallibrary.un.org/record/762672

Magazin CNC (2023). *Gobierno Departamental atiende de manera oportuna emergencia en Santander de Quilichao*. https://www.magazincnc.com/gobierno-departamental-atiende-de-manera-oportuna-emergencia-en-santander-de-quilichao/

Thuro, K., Singer, J., Menschik, B., Breuninger, T., y Gamperl, M. (2020). Development of an early warning system for landslides in the tropical Andes (Medellín; Colombia). *Geomechanics and Tunnelling, 13*(1), 103-115. https://doi.org/10.1002/geot.201900071

Capítulo 7. Consideraciones metodológicas de diagnóstico en un escenario de riesgos socionaturales: geológicos e hidrometeorológicos

José Emilio Baró Suárez [1]
Francisco Zepeda Mondragón [2]
Armando Arriaga Rivera [3]

Introducción

El objetivo del presente capítulo, es abordar algunos aspectos metodológicos que a nuestro juicio deben considerarse con mayor amplitud en los análisis de los escenarios de riesgo socionaturales: geológicos e hidrometeorológicos, los cuales contribuyen a un mayor conocimiento de riesgo, causas o factores subyacentes que lo construyen en aras de ayudar a las autoridades y operativos de protección civil y realizar una mejor gestión del territorio en riesgo. Para ello, se toma en consideración la experiencia de casos de estudios, conferencias, cursos y de investigaciones realizadas en diferentes escenarios del país.

Inicia considerando los aspectos relacionados a temas legales, normativos, reglamentarios e institucionales. Como segundo aspecto, temas relacionados con el enfoque ecosistémico en la gestión integral de riesgo, para posterior-

1 Doctor en Geografía. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

2 Doctor en Ciencias Ambientales. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

3 Doctor en Humanidades Estudios Históricos. Sociedad Hijos de Calimaya, A.C. (CONACYT-RENIECYT), Asociación Mexiquense de Cronistas Municipales, A.C., Colegio de Ciencias Geográfica del Estado de México, A.C. y Asociación Nacional de Cronistas de Comunidades y Ciudades Mexicanas, A. C.

mente pasar a analizar, tópicos concernientes a factores subyacentes, constructores de los escenarios de riesgo, percepción del riesgo, historicidad de eventos y uso de los Sistemas de Información Geográfica como herramienta fundamental de gestión.

Todos los aspectos mencionados constituyen temas cardinales para poder cumplir con las prioridades que nos plantea el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, también el fortalecimiento y consolidación de los estudios de riesgo que se ejecutan en el país.

1. Aspectos legales, normativos, reglamentarios e institucionales

Todo estudio de riesgo, ya sea de análisis, evaluación o gestión, incluyendo los atlas de riesgo, deberá partir de bases legales, normativas, reglamentarias e institucionales que lo sustenten. El conocimiento de la ley resulta extremadamente importante, ya que detrás de cada violación se construye un escenario de riego, como por ejemplo las violaciones reiteradas al reglamento de los usos del suelo establecidos en los ordenamientos territoriales, la Ley de Aguas Nacionales, Ley General de Asentamientos Humanos; violaciones de lo establecido en los reglamentos de construcción, normas sismoresistentes y otras bases legales y reglamentarias.

Toda investigación de riesgo deberá iniciar con un análisis del cumplimiento de las bases legales normativas y reglamentarias para comprender y diagnosticar el escenario de riesgo en la comunidad.

La cultura legal constituye un instrumento importante de resiliencia ya que es parte de la formación, capacitación y superación de los recursos humanos que intervienen en la protección ciudadana.

2. Marco legal Internacional

Partiendo del marco legal internacional, el principal lo compone el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. Desde la realización del Marco de Acción de Hyogo en 2005, se documenta en informes nacionales y regionales acerca de los progresos en su aplicación a nivel mundial. Los países y otros actores que han logrado avanzar en la reducción del riesgo de desastres desde lo local hasta lo mundial, ha contribuido a la disminución de la mortalidad en el caso de algunas amenazas. La reducción del riesgo de desastres es una inversión que previene pérdidas futuras. Su gestión eficaz contribuye al desarrollo sostenible (NU, 2015: 9).

El programa del Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030 plantea cuatro prioridades de acción (NU, 2015: 14) que es importante se conozcan y dominen por parte de los operativos de protección civil y todo decisor en materia de desarrollo territorial, ya que como bien se

plantea en el párrafo anterior, su dominio contribuye a fortalecer continuamente el desarrollo sostenible y la resiliencia territorial. Estos puntos cardinales en materia de gestión, benefician las inversiones que se realizan en un territorio; fortaleciendo las comunidades y generando la reducción de sus vulnerabilidades.

> *Prioridad 1. Comprender el riesgo de desastres. Las políticas y prácticas en la gestión del riesgo de desastres deben basarse en la comprensión de todas las dimensiones de la vulnerabilidad, capacidad, exposición de las personas y bienes, así como de las características de las amenazas y el entorno (NU, 2015: 14).*

Para esta prioridad, el diagnóstico de los factores subyacentes ha intervenido en la construcción de los escenarios de riesgo que resulta prioritario; de esta manera, se deberá alinear las diferentes herramientas de gestión integral de riesgo y de protección civil. Por ejemplo, los estudios de ordenamiento de territorio, los planes de desarrollo, los estudios de cuencas hidrológicas y atlas de riesgo, fundamentalmente.

> *Prioridad 2. Fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres con la finalidad de gestionar el riesgo. La gobernanza del riesgo de desastres en los ámbitos nacional, regional y mundial, para contar con una gestión eficaz y eficiente del riesgo de desastres en los tres niveles. Es preciso contar con objetivos, planes, competencias y directrices en coordinación con los diferentes sectores, así como la participación de los actores adecuados. Por tal motivo, el fortalecer la gobernanza del riesgo de desastres en la prevención, mitigación, preparación, respuesta, recuperación y rehabilitación, implica y fomenta la colaboración y alianzas entre mecanismos e instituciones en la aplicación de los instrumentos necesarios para la reducción del riesgo de desastres, así como del desarrollo sostenible (NU, 2015: 17).*

Por tal motivo, el conocimiento y dominio de los marcos legales, normativos, programáticos, reglamentarios e institucionales, juega un papel importante.

> *Prioridad 3. Invertir en la reducción de riesgo de desastres y fortalecer las capacidades de resiliencia. Las inversiones públicas y privadas en la prevención y reducción del riesgo de desastres, a través de medidas estructurales y no estructurales, son fundamentales para aumentar la resiliencia económica, social, sanitaria y cultural de las personas, las comunidades, los países y sus bienes, así como de su entorno ambiental. Estos factores impulsan la innovación, el crecimiento y la creación de empleos. Estas medidas son eficaces a partir del costo para salvar vidas, prevenir y reducir las pérdidas, con la finalidad de asegurar la recuperación y rehabilitación efectiva (NU, 2015: 18).*

Las evaluaciones de riesgo, el cálculo de los daños y las pérdidas en el territorio, juegan un papel importante, porque no podemos plantear inversiones y medidas estructurales y no estructurales, sin haber realizado una correcta y detallada evaluación del impacto socioeconómico fenómeno natural; de esta forma determinar los costos y beneficios de las decisiones que se tomen.

> *Prioridad 4. Aumentar la preparación en casos de desastre a fin de dar una respuesta eficaz y reconstruir los ámbitos de recuperación, rehabilitación y reconstrucción. El crecimiento del riesgo de desastres, incluido el aumento del grado de la exposición de las personas y los bienes, combinado con la enseñanza extraída de desastres pasados, puso de manifiesto la necesidad de fortalecer la preparación para los casos de desastres, adoptar medidas con anticipación a los acontecimientos, integrar la reducción de riesgo de desastres en la preparación y asegurar que se cuente con capacidad suficiente para proporcionar una respuesta y recuperación oportuna a todos los niveles (NU, 2015: 21).*

En este sentido, la capacitación, superación y preparación constante de los operativos de protección civil como de la población expuesta es esencial, a través de cursos, diplomados, licenciaturas y posgrados. Recursos humanos preparados, significa una resiliencia elevada, permitiendo un mejor conocimiento de riesgo a través de la historicidad de eventos y una transmisión de conocimiento y los saberes de las comunidades. Este punto juega un papel importante del fortalecimiento de las capacidades institucionales, como por ejemplo, en el aspecto técnico referido al uso de los Sistemas de Información Geográfica.

3. Marco legal de México

Considerando este marco legal, es importante para México, tener en cuenta lo planteado en las leyes y normas principales que se presentan a continuación:

Marco legal y normativo de México

- Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos.
- Ley General de Protección Civil de fecha 20 de mayo de 2021 y Reglamento (de fecha 9 de diciembre de 2015) (H. Congreso de la Unión, 2015 y 2021).
- Ley de Aguas Nacionales de fecha 11 de mayo de 2022 y Reglamento de fecha 25 de agosto de 2014 (H. Congreso de la Unión, 2014 y 2022a).
- Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano, de fecha 1 de junio de 2021 (H. Congreso de la Unión, 2021).
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, de fecha 11 de abril de 2022 y Reglamento de fecha 31 octubre de 2014 (H. Congreso de la Unión, 2014 y 2022b).
- Ley General de Población, de fecha 12 de junio de 2018 y Reglamento de fecha 28 de septiembre de 2012 (H. Congreso de la Unión, 2012 y 2018).
- Ley de Planeación, de fecha 16 de febrero de 2018 (H. Congreso de la Unión, 2018).

- Ley General de Desarrollo Social, de fecha 11 de mayo de 2022 y Reglamento de fecha 28 de agosto de 2008 y Reglamento (H. Congreso de la Unión, 2008 y 2022).
- Ley General de Cambio Climático, de fecha 11 de mayo de 2022 (H. Congreso de la Unión, 2022).

Otras leyes de ámbito estatal y bandos municipales así como reglamentos asociados.

Normas mexicanas

- Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-007-SSPC-2019, establece las especificaciones mínimas de la seguridad estructural en los establecimientos con la finalidad de prestar servicios de atención médica hospitalaria y prevención de desastres.
- Normas ante sismos e incendios NOM-002-STPS-2010 y la nom-008-segob-2015, el objetivo es establecer requerimientos para prevenir y proteger contra incendios y sismos los centros de trabajo.

Reglamentos

- Reglamentos Construcción México (cada estado cuenta con sus reglamentos y licencias).
- Reglamento de usos del suelo en materia de ordenamiento territorial (algunos municipios y estados del país cuentan con este instrumento como el Estado de Veracruz, el municipio de Tijuana, Baja California y Naucalpan de Juárez, Estado de México).

Marco institucional

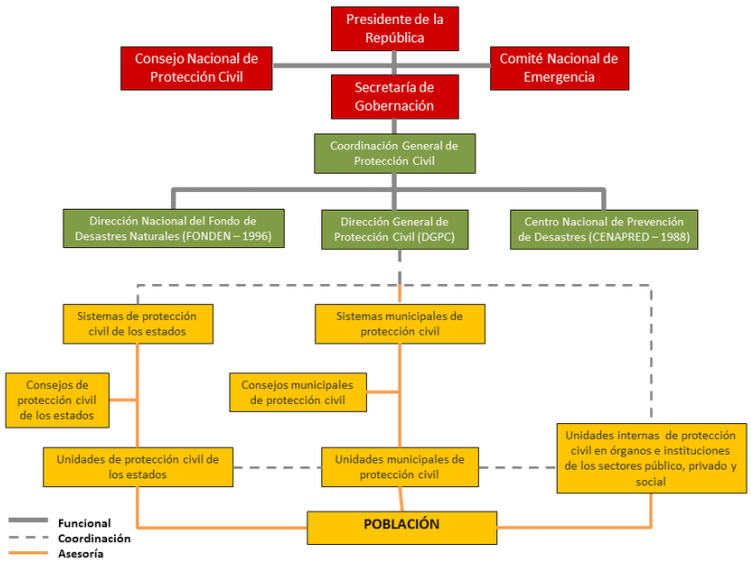
Referente al tema del marco institucional, es importante pronunciarnos en lo pertinente a la vulnerabilidad institucional, la cual es causa de la vulnerabilidad, sin embargo, es tratada superficialmente en los estudios de riesgo.

Si contamos con instituciones débiles en cuanto a recursos humanos, capacidades y financiamiento, tendremos en proporción vulnerabilidades altas desde la institucional a la socioeconómica y estructural. Primero se tienen que fortalecer las instituciones con personal idóneo, preparado y capacitado que permita el análisis sistémico de los escenarios de riesgo, fundamentalmente en las etapas de previsión y prevención establecidas en la Ley General de Protección Civil en lo referente a la Gestión Integral de Riesgo para México. Debemos dotar de capacidades técnicas como soportes informáticos y geotecnológicos que permitan realizar análisis integrales de las diferentes situaciones de riesgo; para ello, el conocimiento de las potencialidades de los sistemas

de información geográfica es de vital importancia en la reducción de las vulnerabilidades.

Otra situación que lastra la actividad de protección civil como institución en el país, es la ausencia de trascendencia por la renovación del personal de dirección y operativo cada tres años, afectando la continuidad y seguimiento de las medidas aterrizadas en el territorio; aunado a los temas de corrupción, que todavía persisten en muchas instituciones (Esquema 1).

Esquema 1. Marca institucional



Fuente: SEGOB (2006).

4. Ecosistema (Enfoque ecosistémico)

Ante todo, debemos saber que desarrollamos nuestras vidas en ecosistemas naturales o construidos. Su conocimiento resulta de primordial importancia, ya que como sabemos su estabilidad depende de la capacidad de acogida y resiliencia del territorio que conforma. Dentro de los procesos naturales cíclicos destacan el clima, uno de los factores más influyentes a corto y mediano plazo, por efecto de la temperatura, la estacionalidad y las lluvias. También tienen influencia los incendios, inundaciones y deslizamientos de tierra; en ocasiones, son fatales para un ecosistema y para la vida humana, ya que modifican el equilibrio de su entorno (NU, 2005: 10).

En los estudios de riesgo (análisis de riesgo y atlas de riesgo) es importante el conocimiento de cuatro temas concernientes a los ecosistemas, los cuales están inmersos dentro de los escenarios de riesgo:

1. Tipo de ecosistema y sus características.
2. Fuerzas de cambio o presiones ambientales a las que está sometido.
3. Bienes y servicio ambientales que prestan.
4. Condiciones de supervivencia.

Nos detendremos en el aspecto 2, del conocimiento de los ecosistemas.

Fuerzas de cambio que están sometidos recurrentemente los ecosistemas y a la vez generan peligros y riesgos socionaturales son:

- Los cambios de uso del suelo, predominando el uso habitacional, uso agrícola e industrial y anulando en muchos casos los usos de conservación.
- La deforestación, ya sea con fines de urbanización, sobreexplotación del recurso maderero o asociado a la tala clandestina.
- Plagas y enfermedades. Por ejemplo, las tasas de polinización y dispersión de semillas son afectadas en bosques tropicales perturbados por las actividades humanas, comprometiendo la regeneración del bosque y el mantenimiento de su biodiversidad (Benítez, 2020).
- Incendios forestales.
- Erosión de los suelos.
- Cambio climático.
- La ausencia o débil gestión de las áreas naturales protegidas.

Estas fuerzas de cambio afectan considerablemente los servicios ambientales que prestan los ecosistemas; generando peligros y escenarios de riesgos socionaturales.

Es por eso que los análisis y evaluaciones de riesgo deberán considerar, dentro de los factores subyacentes, constructores de escenarios de riesgo; fuerzas de cambio que generan un aumento en la vulnerabilidad ambiental y socioeconómica por la afectación que trae consigo los medios de vida o sustento de las comunidades.

En este punto juega un papel importante la eficiente gestión de las diferentes áreas naturales protegidas y su alineación con la gestión de los ordenamientos territoriales y los atlas de riesgo. En este punto se precisa de un conocimiento ambiental amplio que nos permita considerar medidas preventivas con un enfoque ecosistémico. La gestión ambiental contribuye a contener y reducir el efecto de las fuerzas de cambios mencionadas anteriormente.

Es por ello que las direcciones de ecología, desarrollo urbano (ordenamiento territorial), obras públicas, tesorería, protección civil de los ayuntamientos, deberán trabajar coordinadamente haciendo uso de las diferentes herramientas de gestión ambiental y territorial.

Recomendamos la bibliografía *Herramientas de Protección Civil y Gestión Integral de Riesgo en México* (2022) aparece la mayoría de los instrumentos básicos en materia de gestión integral de riesgo y protección civil. La obra considera una serie de instrumentos transversales, por ejemplo: el ordenamiento territorial, las áreas naturales protegidas, evaluación de impacto ambiental, entre otras (Baró, 2022: 18).

5. Historicidad de eventos

Es importante que la historicidad de eventos sea tomada en cuenta con los estudios de riesgo, ya que nos permite tener una visión y comprensión más amplia del escenario de riesgo en cuestión. Hay que buscar en todas las fuentes existentes la historia de los factores subyacentes constructores del escenario de riesgo, la magnitud, la intensidad, la recurrencia, las pérdidas o daños presentados; las afectaciones estructurales a los asentamientos humanos, las reconstrucciones de escenarios de riesgo, las opiniones y saberes tradicionales de las comunidades. Toda esta información nos servirá para sustentar objetivamente nuestro enfoque sistémico de investigación con un carácter preventivo.

Desde el origen de la vida, la Tierra ha sufrido cambios extremos en el clima: enfriamientos globales (glaciación Bola de Nieve, cuando los hielos cubrieron el planeta, y calentamientos que la abrasaron). Con cada uno produciendo extinciones casi completas en la mayoría de las especies, provocando un "reseteo" de la vida y consintiendo el desarrollo de nuevos prototipos con mejores características para sobrevivir. También ocurrieron cambios climáticos menos severos que sirvieron para "retocar" la evolución biológica. En cuanto a la especie humana, los cambios del clima no solo condicionaron su evolución, sino que determinaron su desarrollo cultural e historia (Campillo, 2018) (Figura 1).

La documentación e información histórica en México posee innumerables noticias y referencias a los escenarios de riesgos socionaturales como son:

- Hundimientos.
- Deslizamientos.
- Inundaciones .
- Sismos.
- Erupciones Volcánicas.
- Sequías, entre otros.

Lo anterior representa un potencial significativo para el establecimiento de la evolución temporal de los riesgos y la reconstrucción de los escenarios más representativos que han quedado en la memoria de las personas expuestas (estudio de percepción del riesgo).

Recomendamos la obra de Investigación Forense de desastres. Un marco conceptual y guía para la investigación, escrito por los autores: Anthony Oliver Smith, Irasema Alcántara Ayala, Ian Burton y Allan M. Lavell (Oliver *et. al.*, 2016).

Figura 1. Variaciones del clima en los últimos 2000 años



Fuente: *National Academy of Science*, 2006 citado en Campillo, 2018.

6. Percepción y aceptación social del riesgo

La sociedad del riesgo es un estadío moderno en el que la producción de riesgos: políticos, ecológicos e individuales cada vez más fuera del control de las instituciones que tienen que garantizar la seguridad a la población. Al respecto, Beck señala que a mediados de la década de los ochenta, la ciudadanía ha estado formando una imagen diferente de los riesgos a los que se había expuesto y muestra una desconfianza hacia las instituciones encargadas de controlarlos. Por lo tanto, la sociedad de riesgo inicia donde los sistemas de normas y las instituciones sociales fracasaron por no lograr la seguridad prometida. Ulrich Beck señala que los peligros y los riegos no son atribuibles a la naturaleza; los dioses o fuerzas metafísicas sino dependen de decisiones adoptadas de instituciones sociales e individuales (Olcina y Ayala, 2022: 56).

Así también, resulta importante observar este cambio de percepción de los eventos extraordinarios, produciendo en sociedades desarrolladas y de consumo en el incremento de su nivel de vida. Las sociedades piensan que, con el aumento de las posibilidades económicas y la mejora de los conocimientos científicos y técnicos, se otorgaría la salvaguarda plena ante los peligros. De ahí que los daños asociados a uno de estos, se consideran provocado por una

naturaleza problemática, sin darse cuenta que, justamente, la búsqueda del progreso colectivo no respeta sus reglas. Por ejemplo, en la consideración del riesgo de sequía, conforme va aumentado el nivel de vida, las sociedades desarrolladas pasaron de la austeridad en el gasto del agua al despilfarro (Olcina y Ayala, 2002).

Partiendo de lo que aborda Olcina y Ayala referente a la percepción del riesgo, podemos plantear que estos instrumentos, unidos al de historicidad de eventos, constituyen instrumentos primarios de conocimientos y gestión; ya que podemos obtener información objetiva y clave para la toma de decisiones, considerando los estilos de vida, los conocimientos, la idiosincrasia y el imaginario colectivo de las comunidades expuestas. Estas investigaciones contribuirán a reducir la vulnerabilidad global territorial (Olcina y Ayala, 2002).

7. Evaluación de riesgo socionatural

La evaluación de riesgo socionatural (proceso metodológico) que determina las pérdidas o daños ambientales, económicos, materiales y humanos que se producen por la exposición ante los efectos hostiles de un evento natural o antropogénicos, siendo importante parte de la gestión integral de riesgo.

En este apartado nos detendremos a resaltar la importancia de la evaluación del riesgo. En primer lugar, no representa un instrumento de gestión preventiva, es decir, es un estudio previo que debe realizarse en cualquier escenario de riesgo y su importancia radica en lo siguiente:

- Nos permite conocer las pérdidas y daños futuros que se pueden presentar en un escenario de riesgo.
- A partir de lo mencionado anteriormente, determinar los costos y beneficios de las medidas estructurales y no estructurales.
- Focalizar los recursos para el financiamiento de las diferentes acciones en cada una de las etapas de la gestión integral de riesgo en México; siendo identificación de los riesgos y/o su proceso de formación, previsión, prevención, mitigación, preparación, auxilio, recuperación y reconstrucción (H. Congreso de la Unión, 2015 y 2021).
- Establecer las pólizas de seguro, reaseguro, microseguros y otros mecanismos de transferencia del riesgo.
- Financiamiento de la gestión y construcción y actualización de los atlas de riesgo.

8. Alineación de las herramientas de la GIR en el OT

Dentro de la propuesta de la alineación de las herramientas de protección civil y la gestión integral de riesgo en el ordenamiento territorial, es importante el

funcionamiento de los consejos Municipales de Protección Civil. Consideramos los siguientes puntos:

1. El Plan de Desarrollo Municipal es un proceso de planeación institucional y democrática, donde convergen distintas actividades guiadas por aspectos metodológicos que aportan rigor y validez. Asimismo, deriva de ejercicios de participación ciudadana con el objetivo de integrar propuestas basadas en las necesidades de la población, el contexto regional y local (COPLADEM, 2021: 19).
2. El Programa de Ordenamiento Territorial o Ecológico es un instrumento de política ambiental que tiene por objetivo regular el uso de suelo y las actividades productivas, con la finalidad de proteger el medio ambiente, la preservación y el aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, a partir del análisis tendencial del deterioro y las potencialidades de aprovechamiento (SEMARNAT, 2018).
3. El ordenamiento territorial, conforme a lo señalado por la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano es un instrumento que elabora y conduce políticas de vivienda, ordenamiento territorial, desarrollo agrario y urbano. Además, promueve y coordina con las entidades federativas, municipios y las alcaldías de la ciudad de México, la elaboración de lineamientos para su regulación (SEDATU, 2021):

a. El crecimiento o surgimiento de asentamientos humanos y centros de población.
b. La regularización de la propiedad agraria y sus diversas figuras legales respectivas reconociendo los ejidos, las parcelas, las tierras ejidales y comunales; la pequeña propiedad agrícola, ganadera y forestal, así como los terrenos baldíos y nacionales; los terrenos que sean propiedad de asociaciones de usuarios y de otras figuras asociativas con fines productivos.
c. La elaboración y aplicación territorial de criterios sobre desarrollo urbano, la planeación, control y crecimiento de las ciudades y zonas metropolitanas; además de los centros de población, así como su respectiva infraestructura de comunicaciones, movilidad y servicios para favorecer la calidad de vida de las personas.
d. Los procesos de planeación de los asentamientos y desarrollo urbano, los relacionados a la conservación y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y los recursos naturales.
e. La planeación habitacional y del desarrollo de vivienda digna y segura.
f. El aprovechamiento de las ventajas productivas de las distintas regiones del país.

4. Planes de manejo integral de cuencas en México. El manejo integral de cuencas establece un proceso que alinea, coordina e integra programas hacia objetivos comunes, para lo cual requiere la sinergia, concurrencia, cooperación y colaboración de las instituciones. Esta perspectiva requiere de una base de conocimientos ambientales sobre la estructura y funcionamiento de la cuenca; la estructura incluye las bases para entender el origen y evolución basado en características de los componentes: aire, suelo, agua, biodiversidad (principalmente vegetación) y geomorfología (Cotler y Pineda, 2008: 19-20).

5. Atlas de Riesgos Municipales (considerando lo planteado en el Atlas Nacional y Estatal) se constituyen como un sistema de información de agentes perturbadores y daños esperados; resultado de análisis espacial y temporal de las interacciones entre los peligros, la vulnerabilidad y el grado de exposición de los agentes posiblemente afectables (CENAPRED, 2021). Los Atlas de Riesgo constituyen un reflejo de la acumulación de vulnerabilidades como consecuencias de las distorsiones en la proyección territorial de las políticas públicas establecidas en el Plan Municipal de Desarrollo (PDM) y mal gestionadas en los Programas de Ordenamiento Ecológico y Territorial (POET).

6. Otros estudios:

- Manifestación de Impacto Ambiental (MIA) concebido como un instrumento de la política ambiental cuyo objetivo es prevenir, mitigar y restaurar los daños al ambiente, así como regular obras o actividades para evitar o reducir los efectos negativos en el ambiente y la salud humana (Procuraduría Federal de Protección al Ambiente, 2019).
- Estudio de Riesgo Ambiental (ERA) conforma un instrumento preventivo que tiene por objetivo proteger la sociedad y el ambiente de posibles accidentes ambientales por la liberación de sustancias consideradas como peligrosas (Segambiental, 2020).

Las herramientas anteriormente planteadas, necesitan de su integración y alineación con el objetivo que tenga coincidencias en su cartografía y en sus planteamientos; no se puede seguir observando en varios estudios que no coincide su localización con el diagnóstico.

9. Sistemas de información geográfica (SIG), modelo y cartografía

El conocimiento del territorio y la cartografía es una estrategia de sobrevivencia, manifestada como elemento de análisis espacial empleado por generaciones. Las primeras representaciones son de hace 15,000 años aproximadamente con las pinturas rupestres (paredes de las cuevas de Lascaux, Francia), los hombres de Cro-Magnon pintaron en las paredes animales que cazaban, asociando estos dibujos con líneas, se cree fueron rutas de migración de esas

especies. Siendo una representación simplista de un sistema de información geográfica, con dos elementos básicos: una imagen asociada y un atributo de información como señaló Norbert Aujoulat en su obra *Lascaux Cave* (Arriaga, 2012: 94).

Los sistemas de información geográfica se fraccionan en tres etapas (Arriaga, 2012: 94):

> *La primera etapa (teoría cartográfica) basada en dos niveles de información: datos geográficos (Vector), son diferentes rasgos geográficos representados en la cartografía básica y temática; forma de entidades que gráficamente representan: puntos, líneas y áreas como señala INEGI dentro de sus aspectos técnicos y normativos más la sobreposición (análisis que permite la interrelación de información espacialmente) (Arriaga, 2012: 94).*

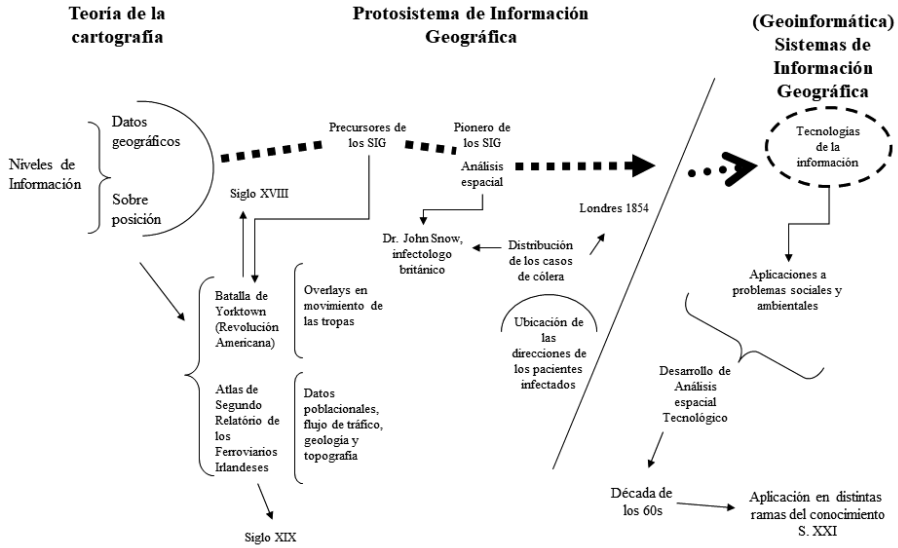
La segunda (protosistema información geográfica) ejemplifica de manera analógica el análisis espacial para detectar y localizar patrones espaciales como señaló Rodrigo Nobrega (2002), citado en Arriaga (2012: 94-95):

La idea de representar mapas bajo la forma de niveles de información sobrepuestos, e intentar relacionar espacialmente los objetos representados, fue en fechas muy anteriores al desarrollo de los computadores. Por ejemplo, mapas de la Batalla de Yorktown (Revolución Americana) desarrollados por el cartógrafo francés Louis-Alexandre Berthier eran formados por *overlays* mostrando en movimiento las tropas, y el "Atlas del Segundo Relatorio de los Ferroviarios Irlandeses" datado a mediados del Siglo XIX, que mostraba datos poblacionales, flujo de tráfico, geología y topografía sobrepuestos en un mapa base.

Otro estudio considerado pionero en la aplicación de los Sistemas de Información Geográfica y del análisis espacial, fue el estudio de la distribución de los casos de cólera en el centro de Londres en 1854 por el Dr. John Snow, infectólogo británico, en el que al sobreponer en un mapa base de ciudades las direcciones de los pacientes infectados, ubicaron la fuente de contaminación.

La tercera etapa de los sistemas de información geográfica tiene sus inicios en la década de 1960 junto con la geoinformática; diversos factores proporcionan un cambio en el análisis cartográfico, principalmente en el avance de los sistemas computacionales con el desarrollo de nuevas tecnologías en el hardware, especialmente en el área de la computación gráfica, ligados con el avance de teorías de procesos espaciales en geografía social, económica, antropología, etc., así como por la preocupación ante problemas sociales, regionales, urbanos y ambientales que llevaron al surgimiento de diversas técnicas y métodos de análisis espacial. Esquema 2 (Arriaga, 2012: 95).

Esquema 2. Proceso histórico de los Sistemas de Información Geográfica



Fuente: Arriaga, 2012: 95.

Algunos conceptos básicos de los sistemas de información geográfica (SIG) son los siguientes señalados por Rodrigo Nobrega (2002), citado en Arriaga (2012: 96):

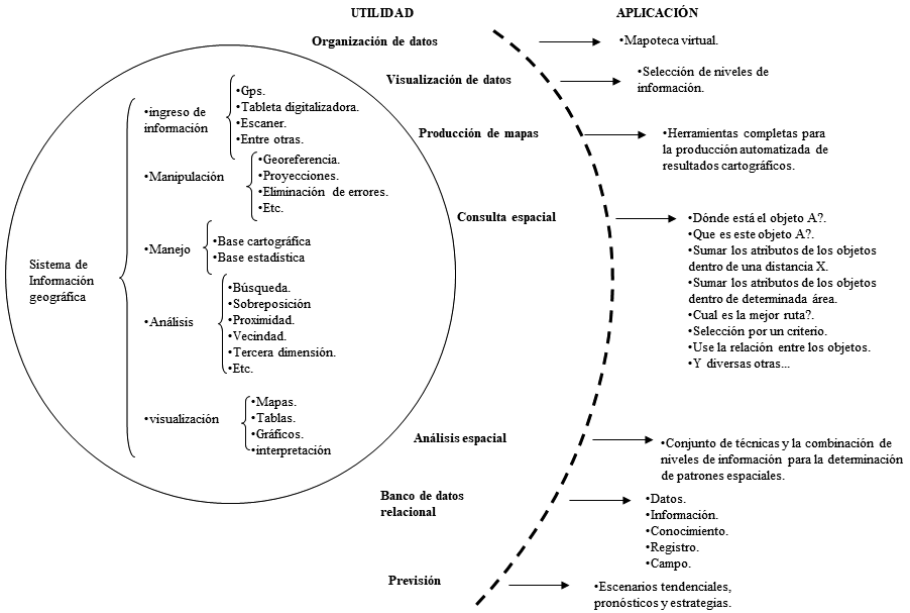
- Esri señala a un SIG como una combinación de *layers* (niveles de información) a modo de ofrecer una mejor comprensión del lugar. La selección de los layers o capas de información puede ser combinada dependiendo del propósito: encontrar el mejor local para un negocio, analizar daños en el territorio, entre otros.
- *National Satellite e Information Service* indica que un SIG consta de un sistema de hardware, software y datos que faciliten el desarrollo, modelamiento y visualización de datos georreferenciados.
- *Science y Engineering en la University of Edinburgh* establece que un SIG es considerado como un equivalente *high-tech* del mapa. Un mapa individual que contiene mucha información que es usada en diferentes formas por diferentes individuos u organizaciones. Los SIG representan un medio de localización en relación al mundo que nos rodea.
- Servicio Geologico de Estados Unidos (por sus siglas en inglés USGS), menciona que un SIG consiste en un sistema de computadores capaz de almacenar, manipular y mostrar información geográfica (datos

identificados de acuerdo con su localización). Asimismo, pueden ser considerados parte del sistema los usuarios y los datos.

Asimismo, los procesos y funciones de un SIG se divide en dos puntos: utilidad y aplicación, como se presenta en el esquema 3, basado en Rodrigo Nobrega (2002) y citado en Arriaga (2012: 96-97):

a. Organización de datos: almacena datos (mapoteca digital) cuenta con ventajas como la reducción del espacio físico y la posibilidad de producir copias sin pérdida de calidad.
b. Visualización de datos: la posibilidad de seleccionar capas de información, mostrando mapas temáticos con base al contexto, esto supera cualquier producto en papel.
c. Producción de mapas: los SIG son una herramienta completa para la producción de mapas, tornándose bastante simples en la generación de grillas de coordenadas, escala gráfica y numérica, leyenda, norte y textos, siendo mucho más conveniente para la cartografía que los sistemas de diseño asistido por computadora (CAD).
d. Consulta espacial: es una función importante de los SIG. La posibilidad de preguntar las características de las propiedades de un objeto, hace que la interacción del usuario y los datos sea muy dinámica y poderosa.
e. Análisis espacial: consiste en el uso de un conjunto de técnicas de combinación entre las capas de información para detectar patrones dentro de los datos. Es una manera de inferir significados a partir de datos espaciales que aparentemente están ocultos y que el especialista tiene la capacidad de descifrar.
f. Banco de datos relacionales: se compone por cuadros, donde almacena la información de los objetos. El contenido de una línea del cuadro, o registro, representa un objeto con sus características, y cada objeto está relacionado a un registro (columna, o campo, que se refiere a una propiedad o atributo de este objeto).
g. Previsión: los SIG pueden verificar escenarios, modificando los parámetros de manera que, al evaluar la problemática, genera patrones de comportamiento, para establecer medidas de solución para la toma de decisiones.

Esquema 3. Procesos y funciones del SIG



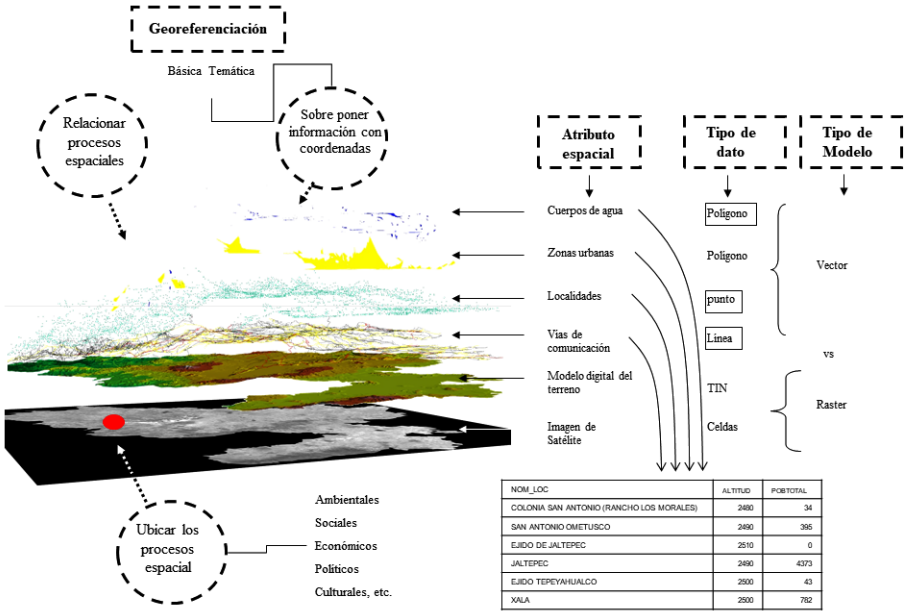
Fuente: Arriaga, 2012: 97.

La geoinformática establece, en los Sistemas de Información Geográfica, a la georeferencia como una cualidad que permite la correlación de los procesos espaciales con la aplicación de la sobreposición de los datos por estar en un mismo sistema de referencia, lo cual permite ubicar los procesos espaciales (ambiental, social, económico, político y cultural, entre otros) (Arriaga, 2012: 98).

Las capas de información están constituidas por un atributo espacial (cuerpo de agua, zona urbana, vías de comunicación, entre otros). En el caso de la información vectorial, estará ligada a un cuadro de información dependiendo del tipo de dato (polígono, línea y punto). En la información raster, estará constituida por celdas de información (renglones y columnas) (Arriaga, 2012: 98).

Tanto el tipo de modelo de información (vector y el raster) tienen características y cualidades propias, que dependerán del objetivo de la investigación y los alcances del análisis espacial que se pretenda (Arriaga, 2012: 98) (Esquema 4).

Esquema 4. Características de un Sistema de Información Geográfica



Fuente: Arriaga, 2012: 98.

Conclusiones

Las conclusiones sobre el diagnóstico de un escenario de riesgo socionatural, hacen ver la importancia de contar con un conocimiento preciso de las causas que propician los riesgos de desastres, ayudando a las autoridades y operativos de protección civil a realizar una gestión adecuada de su impacto en el territorio.

La experiencia que existe en cuanto a los casos de estudios y las investigaciones en el país, están ayudando a concientizar que las amenazas geológicas e hidrometeorológicas estén latentes, por lo que se tienen que estar monitoreando las zonas de recurrencia, para que las autoridades y la población tomen las previsiones necesarias. Sin embargo, aún hace falta más coordinación entre las autoridades y la población de las zonas de riesgo de desastre; para ello se requiere:

- Mejorar la calidad de los estudios de riesgo, propiciando la alineación de los mismos con los ordenamientos territoriales, planes de desarrollo y estudios de cuencas hidrológicas.

- Acompañar a las autoridades en la toma de decisiones, mediante mecanismos de retroalimentación, intercambios, talleres de debate y otras formas de interactuar.
- Acercar los estudios a las comunidades, a través de la participación ciudadana en mesas de debate *in situ*.
- Hacer la gestión más eficiente, mediante un monitoreo y seguimiento conjunto entre los servidores públicos (operativos) y la población de las localidades involucradas en los escenarios de riesgo para generar medidas preventivas tanto estructurales y no estructurales.
- Dominar e integrar las bases legales y normativas en la investigación y el conocimiento del riesgo.
- Aplicar el enfoque ecosistémico, considerando que vivimos inmersos dentro de ecosistemas, artificiales o naturales, los cuales están sometidos a una serie de presiones ambientales que generan peligros y riesgos socionaturales.
- Gestionar financiamientos para la prevención y mitigación del riesgo local de desastre; por ejemplo, los fondos estatales, lineamientos federales de asignación de recursos en materia de prevención de desastres y mecanismos de transferencia del riesgo, como pueden ser los seguros.

Finalmente, las nuevas tecnologías, con el apoyo de los sistemas de información geográfica en la prevención de los desastres, permiten monitorear las zonas de riesgo geológico e hidrometeorológico con la finalidad de ubicar las zonas de evacuación evitando al máximo las pérdidas humanas y de infraestructura urbana y agrícola.

Bibliografía

Alzugaray Ponce, Carolina; Fuentes Aguilar, Andrea; y Basabe, Nekane (2021). Resiliencia Comunitaria: una aproximación cualitativa a las concepciones de expertos comunitarios. *Rumbos TS. 16*(25). http://dx.doi.org/10.51188/rrts.num25.496

Arriaga Rivera, Armando (2012) Introducción de la geoinformática en las tecnologías de la información y comunicación (TIC'S). Revista Legado, año 7, no 12, páginas 81-108. Facultad de Arquitectura y Diseño, Universidad Autónoma del Estado de México.

Ayuntamiento de Naucalpan de Juárez (2005). *Reglamento del ordenamiento territorial de los asentamientos humanos y desarrollo urbano del municipio de Naucalpan de Juárez, México*. Bando Municipal. http://ordenjuridico.gob.mx/Documentos/Eliminados/wo29525.pdf

Ayuntamiento de Tijuana (2015). *Reglamento de zonificación y usos del suelo del centro de población de Tijuana, Baja California*. Periódico Oficial No. 38, del 3 de

septiembre de 2010, tomo CXVII. Última reforma P.O. No. 6, Índice, 6 de febrero 2015. https://implan.tijuana.gob.mx/pdf/RM_ZonificacionyUsosdeSuelodelCentrodePoblacion_TJ-BC.pdf

Baró Suárez, José Emilio (2022), *Herramientas de protección civil y gestión integral de riesgo en México*, Clave Editorial (AM Editores, S.A. de C.V). Pp. 81. ISBN: 978-607-437-602-9. http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/113087

Benítez Malvido, Julieta (2020). Enfermedades en bosques y selvas. Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, Universidad Nacional Autónoma de México. https://www.iies.unam.mx/enfermedades-en-bosques-y-selvas/?limit=15&tgid=&yr=2022&type=&usr=&auth=&tsr=

Campillo Álvarez, José Enrique (2018). El clima es el motor de la evolución y de la historia de la humanidad. *Homo Climaticus*. https://mono_obeso.typepad.com/el_mono_obeso/evoluci%C3%B3n-de-la-especie-humana/

Centro Nacional de prevención de Desastres (CENAPRED) (2021). *Usos y aplicaciones del Atlas Nacional de Riesgos Subdirección de Sistemas de Información sobre Riesgos*. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/648813/Unica_Atlas_Nacional_de_Riesgos_Abril_2021_c.pdf

Comité de Planeación para el Desarrollo del Estado de México (COPLADEM) (2021). *Manual para la elaboración de los planes de desarrollo municipal 2022-2024*. Gobierno del Estado de México. https://copladem.edomex.gob.mx/sites/copladem.edomex.gob.mx/files/files/pdf/Manuales/MANUAL_PDM__FINAL_0803.pdf

Cotler Ávalos, Helena; y Pineda López, Raúl (2008). *Manejo integral de cuencas en México ¿hacia dónde vamos?* Boletín histórico del agua. https://biblat.unam.mx/hevila/Boletindelarchivohistoricodelagua/2008/vol13/no39/2.pdf

Gobierno del Estado de Veracruz (2012). *Reglamento de la ley número 241 de desarrollo urbano, ordenamiento territorial y vivienda para el estado de Veracruz de Ignacio de la Llave (Contiene la fe de erratas publicada en la gaceta oficial del 17 de julio de 2013). Reglamento publicado en el Número Extraordinario de la Gaceta Oficial del Estado de Veracruz*, el lunes 7 de mayo de 2012. http://www.veracruz.gob.mx/desarrollosocial/wp-content/uploads/sites/12/2018/01/Reglamento-de-la-Ley-N%C3%BAmero-241-de-Desarrollo-Urbano-Ordenamiento-Territorial-y-Vivienda-para-el-Estado-de-Veracruz-de-Ignac.pdf

H. Congreso de la Unión (2008 y 2022). *Ley General de Desarrollo Social. 11 de mayo de 2022* y *Reglamento de fecha 28 de agosto de 2008*. Diario Oficial de la Federación.

H. Congreso de la Unión (2012 y 2018). L*ey General de Población. 12 de junio de 2018* y *Reglamento* de fecha 28 de septiembre de 2012. Diario Oficial de la Federación.

H. Congreso de la Unión (2012). *Ley General de Cambio Climático*. 11 de mayo de 2022. Diario Oficial de la Federación.

H. Congreso de la Unión (2014 y 2022a). *Ley de Aguas Nacionales*. 11 de mayo de

2022 y Reglamento de fecha 25 de agosto de 2014. Diario Oficial de la Federación.

H. Congreso de la Unión (2014 y 2022b). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*, 11 de abril de 2022 y Reglamento de fecha 31 octubre de 2014. Diario Oficial de la Federación.

H. Congreso de la Unión (2015 y 2021). *Ley general de Protección Civil. 20 de mayo de 2021 y Reglamento* (de fecha 9 de diciembre de 2015). Diario Oficial de la Federación.

H. Congreso de la Unión (2018). *Ley de Planeación*. 16 de febrero de 2018. Diario Oficial de la Federación.

H. Congreso de la Unión (2019). *Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-007-SSPC-2019*. Diario Oficial de la Federación.

H. Congreso de la Unión (2021). *Ley General de Asentamientos Humanos, ordenamiento territorial y desarrollo urbano*. 1 de junio de 2021. Diario Oficial de la Federación.

Nobrega, Rodrigo (2002). T*utorial de Arcgis en españo*l. Traducido al español por Luis H. Retamal M. (Chile). http://www.gratisweb.com/arcgis/tav_conc_es.htm

Norma oficial mexicana (2010). *Norma oficial mexicana NOM-002-STPS-2010. Condiciones de seguridad - prevención y protección contra incendios en los centros de trabajo*. https://dof.gob.mx/nota_detalle_popup.php?codigo=5170410

Norma oficial mexicana (2015). *Norma oficial mexicana nom-008-segob-2015, personas con discapacidad. acciones de prevención y condiciones de seguridad en materia de protección civil en situación de emergencia o desastre*. https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/6087/sg11_C/sg11_C.html

Naciones Unidas (NU) (2005). *Elementos conceptuales para la prevención y reducción de daños. Originados por amenazas socionaturales*. Chaparro A, Eduardo; y Renard R, Matías (editores). Naciones Unidas.

Naciones Unidas (NU) (2015). Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030. Naciones Unidas.

Oliver Smith, Anthony, Alcántara Ayala, Irasema, Burton, Ian y Lavell, Allan M. (2016). *Investigación forense de desastres: Un marco conceptual y guía para la investigación*. Universidad Nacional Autónoma de México. http://www.publicaciones.igg.unam.mx/index.php/ig/catalog/book/71

Olcina Cantos J y Ayala Carcedo, F. (2002). *Riesgos Naturales*. Ed. Ariel. Barcelona.

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (2019). *Manifestación de Impacto Ambiental (MIA).* Gobierno de México. https://www.gob.mx/profepa/articulos/manifestacion-de-impacto-ambiental-mia

Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU, 2021). *Manual de Organización General de la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano.* Diario Oficial de la Federación. Gobierno de México. https://www.dof.gob.mx/

nota_detalle.php?codigo=5622696&fecha=01/07/2021#gsc.tab=0

Secretaría de Gobernación (SEGOB) (2006), *Manual de Organización y Operación del Sistema Nacional Civil.* Diario Oficial de la Federación, 23 de octubre 2006, www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regla/n4.pdf, México, D.F.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT (2018). *Ordenamiento territorial.* https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/compendio_2018/dgeiawf.semarnat.gob.mx_8080/ibi_apps/WFServlet31ca.html

Segambiental (2020). *Estudio de Riesgo Ambiental*. https://segambiental.com.mx/estudio-de-riesgo-ambiental/

Capítulo 8. Historicidad sísmica en el valle de Toluca: Calimaya de Díaz González, 1980-2018

Armando Arriaga Rivera [1]
José Emilio Baró Suárez [2]

Introducción

La historicidad sísmica en el valle de Toluca tiene ciertas deficiencias en sus estudios y acciones. Analizando la localidad de Calimaya de Díaz González durante el período de 1980 a 2018, hace notar que se han presentado eventos sísmicos que no han sido analizados de manera sistemática para prevenir o minimizar los desastres por sismos como el que sucedió el 19 de septiembre de 2017 que afectó la parroquia de San Pedro y San Pablo en la cabecera municipal (construcción novohispana que data del siglo XVI).

El objetivo del presente trabajo es analizar los registros sísmicos que tiene en su base de datos el Servicio Sismológico Nacional (SSN) para relacionarlos con otras variables que no considera lo siguiente: la falta de recarga de los mantos freáticos del valle de Toluca que posiblemente pudieran haber activado la falla de Tenango y los socavones, producto de la explotación irracional de los materiales pétreos utilizados para la construcción.

1. Ubicación geográfica del municipio de Calimaya y la cabecera municipal

El valle de Toluca, con su rica variedad natural de suelos regados por varios ríos, entre los que resaltan el río Lerma y Temascaltepec, ha sido testigo de

1 Doctor en Humanidades Estudios Históricos. Sociedad Hijos de Calimaya, A.C. (CONACYT-RENIECYT), Asociación Mexiquense de Cronistas Municipales, A.C., Colegio de Ciencias Geográfica del Estado de México, A.C. y Asociación Nacional de Cronistas de Comunidades y Ciudades Mexicanas, A. C.

2 Doctor en Geografía. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

la fundación de varios pueblos a lo largo del tiempo que en la actualidad proveen de agua a localidades cercanas, entre ellas el municipio de Calimaya, ubicado en las faldas del volcán (Loera Chávez y García, 1999: 17).

La división política administrativa del municipio de Calimaya se integra por una cabecera municipal (Calimaya de Díaz González) y los pueblos antiguos (La Concepción Coatípac, San Andrés Ocotlán, San Bartolito Tlaltelolco, San Lorenzo Cuauhtenco, San Marcos de la Cruz, Santa María Nativitas Tarimoro, Zaragoza de Guadalupe y San Diego La Huerta) (Loera Chávez y García, 1999: 17) (figura 1 y 2).

La cabecera municipal se conforma a su vez por nueve barrios (Los Ángeles, El Calvario, Guadalupe, San Martín, San Juan, San Pedro y San Pablo, Cruz Verde, Cruz Blanca y El Rosario) y siete colonias (Los Cedros, Los Sauces, El Mirador, Santa Cecilia, Las Torres, Cruz de la Misión y San Pablo) (H. Ayuntamiento de Calimaya, 2018: 6) (Mapa 1).

Figura 1. Ubicación geográfica del municipio de Calimaya en el Estado de México

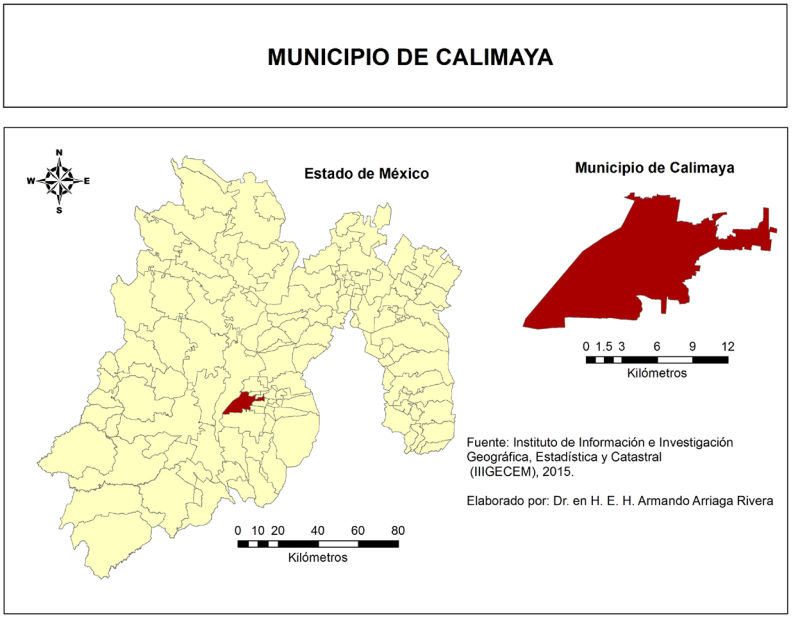
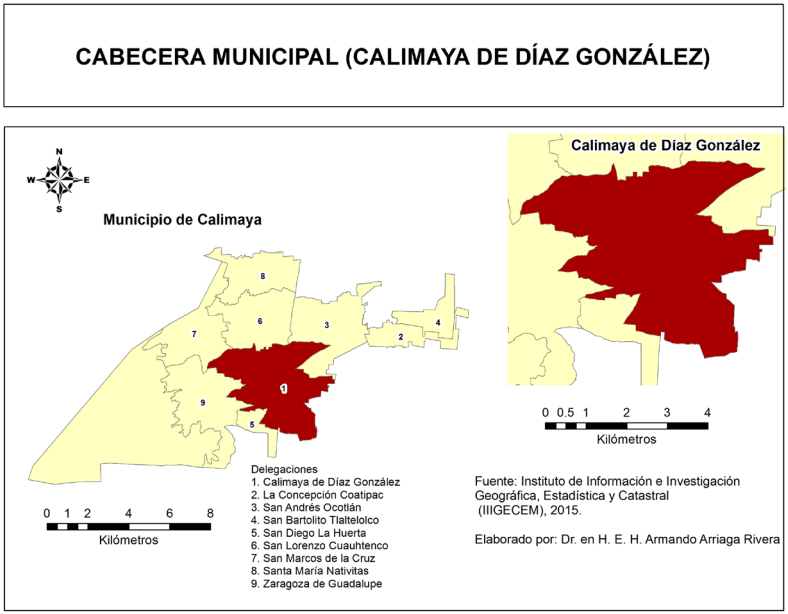


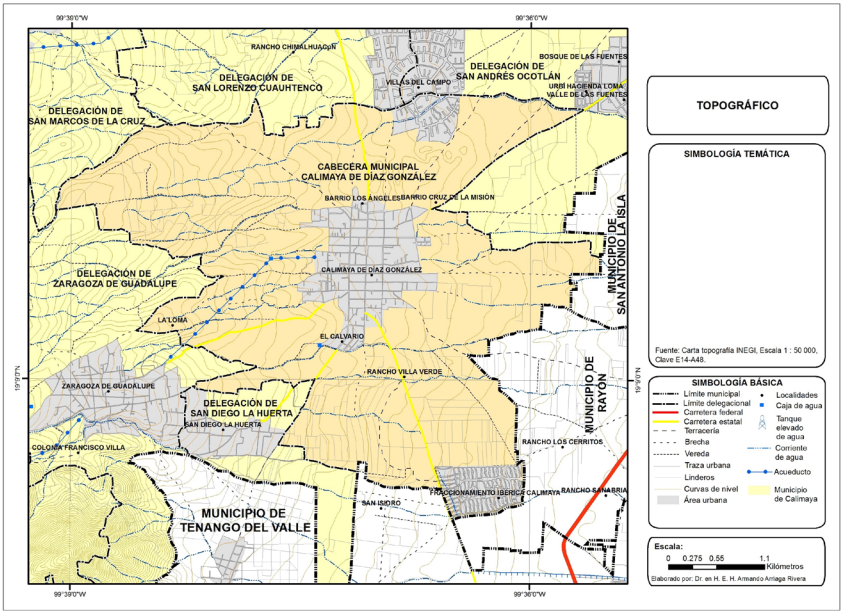
Figura 2. Ubicación geográfica de la cabecera municipal (Calimaya de Díaz González)



Nota: La información proporcionada sólo es de carácter técnico, no constituye resolución en materia de límites, por lo que el presente documento es de carácter enunciativo.

En el caso de la topografía de la cabecera municipal, podemos mencionar que se encuentra en una de las zonas de la ladera oriental del volcán Xinantécatl y la planicie del valle de Toluca; la segunda es para los asentamientos humanos y el desarrollo de la agricultura. La altitud promedio de la localidad es de 2,700 msnm; la altitud mínima es de 2,630 y la máxima es de 2,860 msnm. Las coordenadas geográficas Calimaya de Díaz González son latitud norte: 19° 09′ 39″ y longitud oeste: 99° 37′ 02″. Las localidades con las que cuenta el territorio de la cabecera municipal son: Rancho Villa Verde, La Loma, el fraccionamiento Ibérica Calimaya y el sur del fraccionamiento Villas del Campo. La superficie de la cabecera municipal es de 1,628.60 hectáreas (16.2 km^2) (Mapa 1).

Mapa 1 Topográfico de la cabecera municipal
(Calimaya de Díaz González)

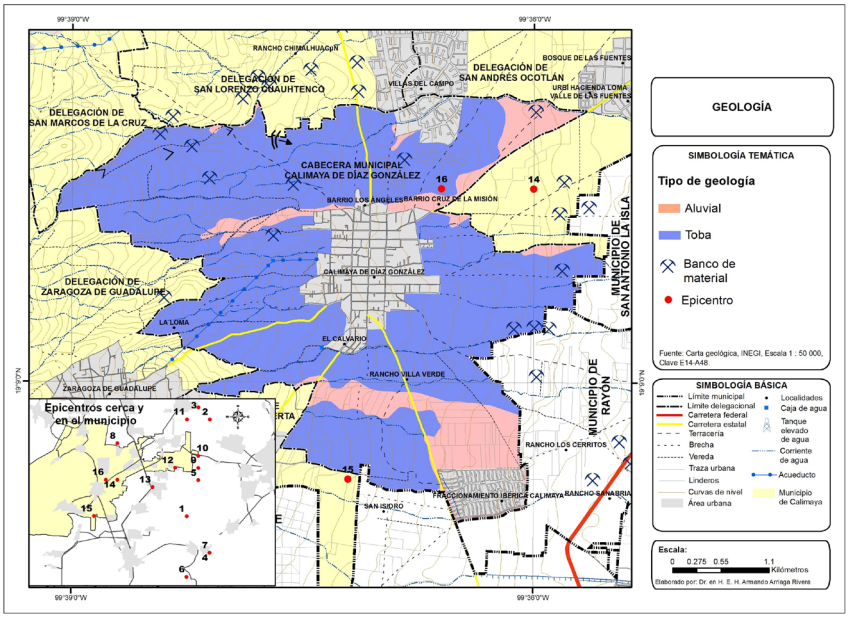


2. Geología

El volcán Nevado de Toluca es uno de los rasgos geológicos más importantes del área, éste aparentemente se encuentra sobre un par de fallas orientadas W-E en dirección a la Sierra de Zempoala descienden en escalones hacia el norte. De acuerdo con Yamamoto y Mota hay evidencia de la existencia de una fosa bajo el flanco norte del Nevado (Yamamoto y Mota, 1988: 283). Asimismo, se localiza a 80 kilómetros al SW de la ciudad de México y 22 kilómetros al SW de la ciudad de Toluca en la región central de la provincia Cinturón Volcánico Trans-Mexicano (García Palomo, 1998: 7; García Palomo *et al.*, 2002: 2).

El tipo de roca que predomina en la cabecera municipal de Calimaya es la toba de origen volcánico, cubriendo el 83.5% del territorio con 1,359.38 hectáreas el 16.5% restante (269.21 hectáreas) se cubre con material de tipo aluvial, el cual se encuentra al sur y oriente de la cabecera municipal, en pocas extensiones (mapa 2).

Mapa 2. Geológico de la cabecera municipal
(Calimaya de Díaz González)



Un tema relacionado con la cabecera municipal es la historia geológica y tectónica del valle de Toluca, que está asociada a la evolución del Eje Neovolcánico, misma que puede dividirse en dos etapas. La primera alcanzó su máximo movimientos en el Mioceno Inferior, formaron las fracturas con dirección SW a NE; característicos del Eje Neovolcánico. Entre 1938 y 1944 durante la construcción del túnel de Lerma que atraviesa la Sierra de las Cruces, evidenciando la existencia de la falla profunda de Huixquilucan que se considera forma parte del sistema de grandes fracturas antiguas en dirección noreste. Esta falla, con orientación aproximada NE-SW, se inicia con una barranca en la vertiente occidental de la Sierra de las Cruces, ubicada inmediatamente al norte de la localidad que toma su nombre; prolongándose por algunos kilómetros hasta perderse bajo el relleno sedimentario del valle de Toluca, zona entre Santiago Tianguistenco y Metepec (Yamamoto y Mota, 1988: 280-283).

Hacia el Plioceno Superior inició la segunda etapa con el proceso tectónico que forma una fractura secundaria dirigida W-E con desplazamientos verticales individuales del orden 100 a 300 metros, produciendo una moderada zona de bloques escalonados. A esta última falla se le conoce como "fractura de los grandes volcanes" porque sus elementos dirigidos de poniente a oriente controlan las chimeneas del Nevado de Toluca, Malinche, Popocatépetl y Pico

de Orizaba. El origen de la sierra del Chichinautzin, que forma el borde sur de la cuenca de México, obedece a estas últimas fisuras en tanto que la sierra de las cruces que separa la cuenca de México de la de Toluca; relacionada con la antigua falla SW – NE (Yamamoto y Mota, 1988: 283).

Asimismo, se describe un conjunto de fallas y fracturas con una orientación E-W y hacia N90ºE y N30ºE a N60ºE se caracterizan por presentar movimientos laterales izquierdos asociados con un desplazamiento normal, cuya inclinación es hacia el norte como menciona Norini citado por Olivares (2020: 10). En este contexto existe un enjambre sísmico al norte del sistema de fallas Tenango que se manifestó entre el 18 al 31 de agosto de 1980 con magnitudes de 2.6 a 3.5, proporcionando datos sobre la geometría subsuperficial indicando la presencia de una falla subvertical sísmicamente a escala de la corteza así con la inferencia de fallas tipo normal escalonadas hacia el Norte afirmado por Yamamoto y Mota, citado por Olivares (2020: 10). Con una longitud de 50 km y un ancho máximo de 10 Km (Olivares, 2020: 48).

3. Historicidad sísmica del centro del valle de Toluca

El servicio sismológico nacional cuenta con una base de datos que permite monitorear los sismos a nivel nacional, su catálogo de sismos cuenta con registro de la magnitud y el epicentro en el país desde 1900. Antes de esta época no existían instrumentos sísmicos, por lo que no era posible registrar las magnitudes de los sismos anteriores. Los paleosismólogos han podido estimar, aproximadamente, la magnitud de algunos sismos a partir de descripciones históricas y observaciones geológicas. Dentro de la zona del municipio de Calimaya y su periferia, en 118 años se han registrado 16 sismos (1980 a 2018). Los epicentros de estos sismos se ubican cerca o dentro del territorio de la cabecera municipal, siendo los números 14, 15 y 16, como se observa en el cuadro 1 y mapa 3.

Al respecto, Macrina Vázquez, reportera de El Sol de Toluca, afirma que el viernes 3 de agosto de 2018, cerca de las 7:42 horas se registró un sismo de magnitud de 3.1 perceptible en los municipios de Rayón, San Antonio La Isla, Calimaya y Tenango del Valle; no se reportaron lesionados ni daños materiales, siendo el tercer temblor registrado en esa semana. Al respecto, Edgar Ángeles Moreno, geólogo de la Universidad Autónoma del Estado de México, menciona que los movimientos son históricos en el Estado de México, debido a que se encuentran dentro de una franja volcánica. Cabe distinguir que existen diferentes tipos de fallas geológicas en las zonas de Acambay, Ixtlahuaca y Tenango del Valle. Edgar Moreno indica que este movimiento puede ser caótico, como un oleaje; es decir, una liberación de energía que se registró el pasado el 19 de septiembre de 2017 por lo que se debe estar consciente que la ciudadanía está ubicada en una zona con fallas activas, conocida como la "falla de Tenango". Asimismo, Luis Quintanar, investigador de sismología

del Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, explica que son normales los sismos con epicentros en zonas mexiquenses, debido a las pequeñas fallas geológicas que pasan por la entidad. Afirma tambien que las fallas no son de varias decenas o centenas de kilómetros, sino pequeñas, pero cuando se activan producen sismos de magnitudes que van de 2.8 hasta 3 (Vázquez, 2018).

Cuadro 1. Catálogo de sismos - Servicio Sismológico Nacional (SSN) UNAM – México

No.	Fecha	Hora	Magnitud	Profundidad	Referencia de Localización	Fecha UTC	Hora UTC
1	19/08/1980	04:52:19	no calculable	4	7 km al Noreste de Tenango de arista, México	19/08/1980	10:52:19
2	20/08/1980	22:31:53	no calculable	4	5 km al sur de San Pedro Tultepec, México	21/08/1980	04:31:53
3	23/08/1980	13:46:23	no calculable	5	4 km al sur de a Mateo Atenco, México	23/08/1980	19:46:23
4	23/08/1980	16:00:17	no calculable	5	7 km al este de Tenango de Arista, México	23/08/1980	22:00:17
5	23/08/1980	20:30:17	no calculable	5	7 km al oeste de Santiago Tianguistenco, México	24/08/1980	02:30:17
6	24/08/1980	20:20:21	no calculable	5	5 km al sureste de Tenango de Arista, México	25/08/1980	02:20:21
7	26/08/1980	12:00:00	no calculable	9	7 km al este de Tenango de Arista, México	26/08/1980	18:00:00
8	27/11/1980	05:43:39	3.3	4	6 km al sur de Metepec, México	27/11/1980	11:43:39
9	07/10/1981	01:01:39	no calculable	5	6 km al oeste de Santiago Tianguistenco, México	07/10/1981	07:01:39
10	03/04/1985	21:18:42	no calculable	5	7 km al oeste de Santiago Tianguistenco, México	04/04/1985	03:18:42
11	03/04/1985	21:19:54	no calculable	5	6 km al sur de San Mateo Atenco, México	04/04/1985	03:19:54
12	30/05/1996	06:20:48	3.2	10	9 km al oeste de Santiago Tianguistenco, México	30/05/1996	11:20:48
13	12/06/2015	14:44:14	3.9	5	7 km al noreste de Tenango de Arista, México	12/06/2015	19:44:14
14	30/07/2018	22:54:00	2.9	3	7 km al norte de Tenango de Arista, México	31/07/2018	03:54:00
15	01/08/2018	00:31:33	2.5	5	5 km al noroeste de Tenango de Arista, México	01/08/2018	05:31:33
16	03/08/2018	07:41:44	3.1	7	8 km al noroeste de Tenango de Arista, México	03/08/2018	12:41:44

Fuente: Servicio Sismológico Nacional (SSN), 2019.

Nota: Fecha y hora local tiempo del centro de México. Coordenadas geográficas: latitud y longitud (epicentro en grados decimales). Profundidad en kilómetros. La localidad es de referencia en cuanto a la cercanía del epicentro.

Macrina Vázquez apunta que el Estado de México han presentado 17 sismos en el 2018, con magnitudes que van de 1.2 a 3.4, localizándose en municipios de Amecameca, Zumpango, Ozumba, Nicolás Romero, Chalco, Tlalmanalco, Naucalpan, Juchitepec y Tejupilco, mientras que el oriente del estado, las localidades más propensas son Ixtapaluca, Chalco y Texcoco. El servicio

sismológico nacional confirmó el 30 de julio de 2018 un primer sismo de magnitud 2.9, a las 22:54 horas con una profundidad de 3 kilómetros con epicentro a 7 kilómetros al noreste de la localidad de Tenango de Arista; un segundo movimiento telúrico, con magnitud de 2.5, al noroeste de Tenango de Arista registrado a las 00:33 horas: después el tercero que ocurrió el viernes 3 de agosto de 2018 a las 7:42 horas, de magnitud de 3.1 perceptible en los municipios de Rayón, San Antonio la Isla, Calimaya y Tenango (Vázquez, 2018).

Los sismos registrados en el centro del valle de Toluca como se observa en el cuadro 1, hasta ahora no han afectado las construcciones, lo que pusiera en riesgo vidas humanas por lo que se deben tomar las medidas pertinentes de monitoreo para prevenir desastres; el sismo del 19 de septiembre de 2017 afectó construcciones en la cabecera municipal de Calimaya, principalmente el templo de San Pedro y San Pablo y algunas construcciones en el centro de la localidad, así como el templo de la localidad de San Andrés Ocotlán con epicentro entre el límite de los estados de Puebla y Morelos.

Así sucede reportó que dos templos del municipio de Calimaya resultaron dañados tras el sismo del martes 19 de septiembre, alrededor de las 2 de la tarde, sin causar daños a personas. En Calimaya de Díaz González, donde se localiza la parroquia de San Pedro y San Pablo, se registró la caída de dos cruces de concreto que se ubicaban en la parte superior del inmueble histórico; una de las cruces pertenecía a la cúpula y una más formaba parte de la torre izquierda que cayó al costado desde una altura de 10 metros. El personal que cuida la parroquia señaló que los habitantes se acercaron apoyando con los trabajos de limpieza afuera del templo. También, en el interior se registraron algunas grietas en las bardas y el techo. El perímetro afectado fue acordonado por elementos de seguridad pública (*Así sucede*, 2017).

Dentro del mismo municipio de Calimaya, el templo de la localidad de San Andrés Ocotlán se afectó en una de las torres, quedando sensible y con el riesgo de colapso en cualquier momento. El presbítero comentó que especialistas (arquitectos y trabajadores de la construcción) recomendaron derrumbar intencionalmente la torre porque podría caer en cualquier instante. Alrededor del templo aún se podían observar los daños ocasionados por este sismo de 7.1 grados de magnitud y en el interior se detectaron grietas en algunos arcos. A las 14:30 horas se realizó un llamado al 911 para solicitar el apoyo de personal de Protección Civil para determinar la situación de la torre y evitar poner en riesgo a la población. Sin embargo, no hubo respuesta hasta después de las 19:00 horas de ese día (Así sucede, 2017) (Fotografía 1 y 2).

Fotografía 1. Afectación en el interior del templo de la parroquia de San Pedro y San Pablo en la localidad de Calimaya de Díaz González, 2017



Fuente: Así sucede, 2017.

Fotografía 2. Afectación en el exterior del templo de la parroquia de San Pedro y San Pablo en la localidad de Calimaya de Díaz González, 2017



Fuente: Así sucede, 2017.

4. Análisis sísmico

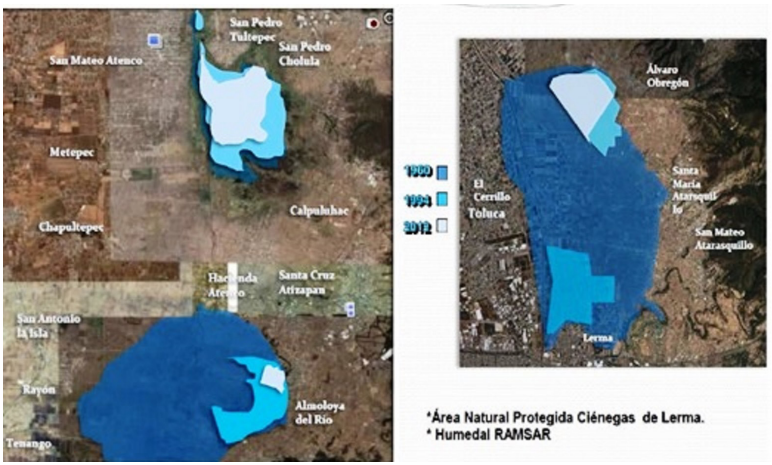
Regresando a los sismos del centro del valle de Toluca causados por la "Falla de Tenango" se desconoce por qué se activó. Si bien hace falta realizar estudios geohidrológicos a detalle, lo más probable es que hayan sido causados por el sistema de abastecimiento de agua potable del Cutzamala que se comenzó a construir en 1976 pasando por varias etapas, siendo ésta una primera variable a considerar.

La primera fase constructiva fue en 1982 con la construcción de la planta de bombeo 5 y su torre de oscilación; el canal Martínez de Meza hacia el primer módulo de la planta potabilizadora "Los Berros" es un acueducto de 77 km de longitud y la subestación eléctrica de Donato Guerra. La segunda etapa se realizó en 1985 construyéndose las plantas de bombeo 2, 3 y 4 para elevar el agua a más de 822 m; dos módulos en la planta potabilizadora "Los Berros" con capacidad de 4,000 l/s, un túnel independiente en Atarasquillo del sistema Lerma y el túnel Analco – San José del sistema Cutzamala. En la tercera fase (1993), se construyeron los subsistemas Chiesdo con la planta de bombeo número 6, el Colorines con una planta de bombeo número 1 y torres; su torre de oscilación es la más alta de todo el sistema Cutzamala con 62 metros y tuberías paralelas para ampliar y proporcionar mayor seguridad a la construcción (Gob.mx, 2016).

La construcción de la cuarta etapa inició el 31 de octubre de 2018, afectando a habitantes de 13 municipios (¿alcaldías?) de la ciudad de México y 13 del Estado de México, que debieron de prepararse para un corte de agua de tres días. Sin embargo, las reparaciones tomaron más tiempo. Se realizaron obras de mantenimiento en la planta potabilizadora "Los Berros" afectando la instalación de válvulas de seccionamiento y desfogue de motores de bombeo; la interconexión de las líneas existentes 1 y 2 de alta presión que van de la planta de bombeo 5 a la torre de oscilación 5; así como la interconexión múltiple de descarga con la segunda línea de alta presión y trabajos para la preparación de interconexión de la línea de succión; de igual manera el mantenimiento de válvulas y banco de transformadores. Finalmente, la sustitución de varios tubos y el reforzamiento de otros (Redacción Obras, 2018).

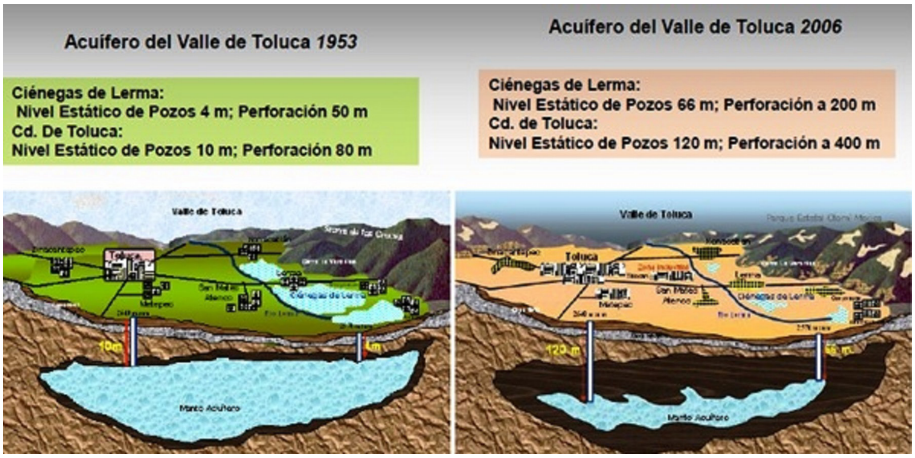
La construcción del sistema de abastecimiento de agua potable del Cutzamala lleva agua a la ciudad de México ocasionado la desecación de la laguna de Chignahuapan (agua superficial), asimismo, la reducción de infiltración de agua a los mantos freáticos subterráneos probablemente ha provocado el asentamiento del suelo del valle y activado la "falla de Tenango" (Figura 3 y 4).

Figura 3. Área Natural Protegida Ciénegas de Lerma y Humedal Ramsar, 1960 y 2012



Fuente: SAOP y Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma, 2012.

Figura 4. Sobreexplotación de acuífero del valle de Toluca, 1953 y 2006



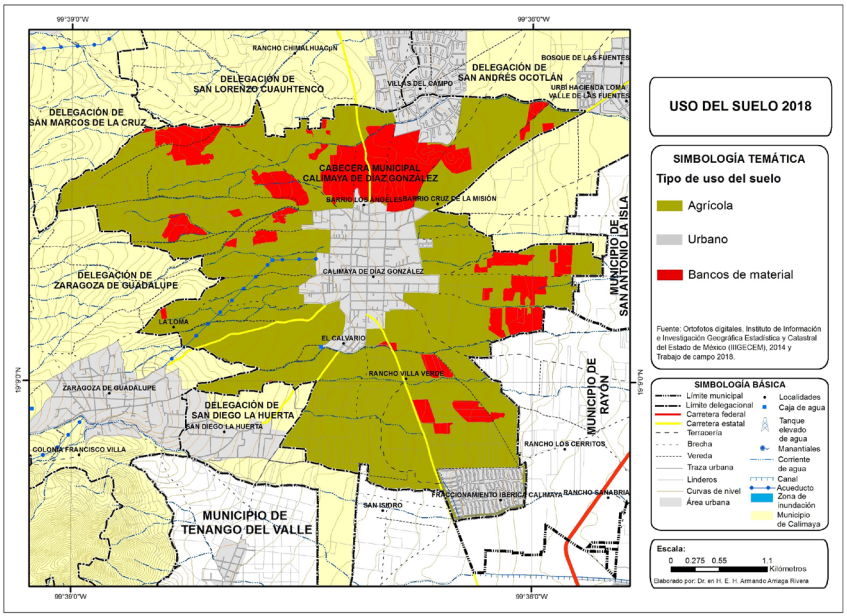
Fuente: SAOP y Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma, 2012.

La finalidad de esta reseña es exponer las etapas constructivas del sistema Cutzamala, reflexionar después de construir el sistema, se registraron sismos a partir de la década de 1980 y los sismos posteriores se registraron antes de

iniciar algún arreglo del sistema. Tal vez esto sucedió porque al acuífero del valle de Toluca ya no le llegaba la misma cantidad de agua, lo que provocó que algunas zonas colapsaran, causando acomodamientos de tierra (Cuadro 1 y Mapa 3).

La segunda variable a discurrir, sería la explotación de materiales pétreos, que están al norte de la cabecera municipal (en el mapa 3 se observan los bancos de materiales explotados en color rojo); estos socavones pueden causar derrumbes por sismos, debido a que no existen terrazas de amortiguamiento ni ninguna aplicación de las normas ambientales para restauración de estas zonas como lo establece la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México. Los usos de suelo en la cabecera municipal para 2018, se distribuyen de la siguiente manera: el área destinada para el uso agrícola era de 1,160 hectáreas que corresponde con el 71.3% del total del territorio destinado al cultivo de temporal. El otro uso es urbano que corresponde a 237.12 hectáreas registrando el 14.6% y 14.2% del área de minas con 230.59 hectáreas (Mapa 3).

Mapa 3. Uso del suelo de la cabecera municipal (Calimaya de Díaz González), 2018.



Finalmente, estas dos variables en combinación con otros eventos sísmicos regionales pueden desencadenar un riesgo geológico principalmente en la ca-

becera municipal, por lo tanto, deben tomar las medidas pertinentes y evitar poner un riesgo para la población de esta localidad.

Conclusiones

Esta área geográfica se encuentra en una zona sísmica por la "falla de Tenango". Por lo tanto, las autoridades deben de tomar en cuenta las medidas preventivas antes, durante y después de un sismo para comunicarlo a la población en riesgo. Además, desarrollar y aplicar las medidas para salvaguardar las construcciones actuales, los monumentos históricos y las futuras edificaciones, ante el embate de los sismos y considerar sus efectos dentro de los planes de desarrollo, programas de ordenamiento territorial y los atlas de riesgos.

Otra problemática que afecta a las zonas urbanas son las minas a cielo abierto que existen dentro del territorio de la cabecera municipal y que se encuentran en la orilla norte. En estos sitios, se deben implementar medidas de recuperación y restauración con la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Estado de México ya plantea, pero dentro del municipio de Calimaya no se aplican.

La "falla de Tenango" en combinación con otros sismos de alta magnitud generados en diferentes epicentros activa la falla y genera riesgo de desastre en las zonas urbanas y de minas a cielo abierto, situación que se debe tomar en cuenta para plantear medidas estructurales (construcción física edificada con medidas para reducir o minimizar el riesgo) y no estructurales (leyes, programas y planes de desarrollo) para prevenir y minimizar el riesgo local de desastre.

Finalmente, una de las soluciones que minimizan el riesgo de desastre en la cabecera municipal de Calimaya y valle de Toluca son obras hidráulicas de captación de agua residual y pluvial como una medida de recuperación de agua canalizada para abastecer a los mantos freáticos del valle de Toluca, con la finalidad que la "falla de Tenango" no tenga posibilidad de ser activada por efectos del excesivo bombeo al que está sometido el acuífero o se puedan formar nuevas grietas o fracturas dentro del valle de Toluca.

Bibliografía

Así sucede (2017). Dañados templos en Calimaya por sismo. *Así sucede*. https://asisucede.com.mx/cruces-iglesia-calimaya-cayeron-sismo/.

Definición ABC (2007-2018). Arquitectura Art Déco, *Definición ABC*. Tu diccionario hecho fácil. https://www.definicionabc.com/historia/art-deco.php.

Espinosa Rodríguez, Luis Miguel (2001). *Geomorfología del noreste del nevado de Toluca*. (Tesis de maestría), Universidad Nacional Autónoma de México.

García Palomo, Armando (1998). *Evolución estructural en las inmediaciones del Volcán Nevado de Toluca, Edo. de México*. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de https://repositorio.unam.mx/contenidos/427609

García-Palomo, A., Macías, J.L., Arce, J.L., Capra, L., Garduño, V.H., y Espíndola, J.M. (2002). Geology of Nevado de Toluca Volcano and surrounding areas, central Mexico. *Geological Society of America Map and Chart Series MCH089.*

H. Ayuntamiento de Calimaya (2018). *Bando Municipal*. H. Ayuntamiento de Calimaya 2016-2018.

Loera Chávez y Peniche, Margarita y Federico García y García (1999). *Calimaya Monografía municipal*. Gobierno del Estado de México y H. Ayuntamiento de Calimaya.

Olivares Sánchez, Ruth Araceli (2020). *Geología ambiental y peligros geológicos a lo largo de las fallas de Tenango, Estado de México*, Tesis de licenciatura. Facultad de Geografía. Universidad Autónoma del Estado de México. http://ri.uaemex.mx/handle/20.500.11799/109023

Redacción Obras (2018). *Las obras que se harán en el Cutzamala durante el corte de agua Obras*. http://obrasweb.mx/construccion/2018/10/24/las-obras-que-seharan-en-el-cutzamala-durante-el-corte-de-agua

Red sísmica del CICESE (RSC) (2017). *Reporte del sismo del 19 de septiembre de 2017 a las 18:14:40 UTC (13:14:40 tiempo en el centro de México) Magnitud 7.1. RSC y RESNOM*. https://resnom.cicese.mx/sitio/ui/img/boletines/sismo-19-sept-2017.pdf

SAOP y Comisión Coordinadora para la Recuperación Ecológica de la Cuenca del Río Lerma (2012). *Caso cuenca alta Lerma y proyecto integral de saneamiento. Foro del agua.* http://www.foroconsultivo.org.mx/eventos_realizados/foro_agua_2012/presentaciones/barcelo.pdf.

Servicio Sismológico Nacional (SSN) (2019). *Catálogo de sismos - Servicio Sismológico Nacional (SSN)*. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Vázquez, Macrina (2018), Se registra tercer sismo en el valle de Toluca durante esta semana, *El Sol de Toluca,* viernes 3 de agosto de 2018. https://www.elsoldetoluca.com.mx/local/ser-registra-tercer-sismo-en-el-valle-de-toluca-en-durante-esta-semana-1889551.html

Yamamoto, J. y Mota, R. (1988). La secuencia de temblores del Valle de Toluca, México, de agosto 1980. Geofísica Internacional, 27, 279–298.

Capítulo 9. Influencia del riesgo en el territorio: una visión para el ordenamiento ecológico territorial en Colombia

David Alejandro Muñoz [1]
José Emilio Baró Suárez [2]
Xanat Antonio Némiga [3]
Elkin de Jesús Salcedo Hurtado [4]

Introducción

Los planes de ordenamiento territorial en Colombia (POT) se construyeron sobre la base de la Ley 388 de 1997, con el objetivo de entregar a los distritos y municipios un protocolo metodológico para la planificación del territorio. En este sentido, enmarcado en el POT, se encuentran las disposiciones generales para el uso del suelo urbano y rural como se ilustra en la figura 1 y 2.

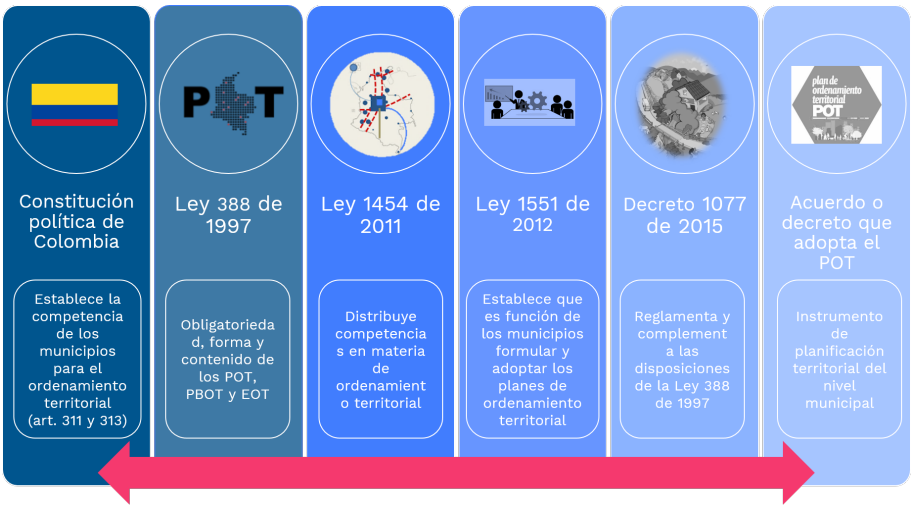
1 Magister en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

2 Doctor en Geografía. Facultad de Geografía. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

3 Doctora en Ciencias en Manejo de Recursos Naturales. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

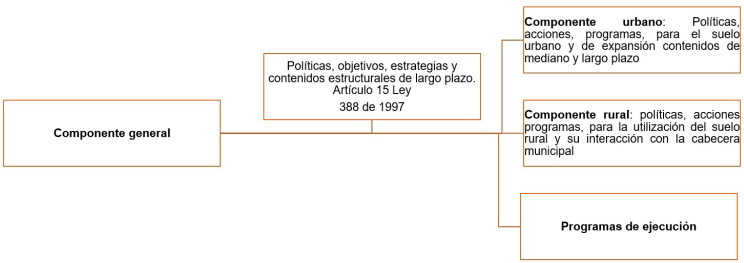
4 Doctor en Física y Matemáticas. Facultad de Humanidades, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Figura 1. Marco normativo del ordenamiento territorial



Fuente: Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia, 2023.

Figura 2. Estructura del POT

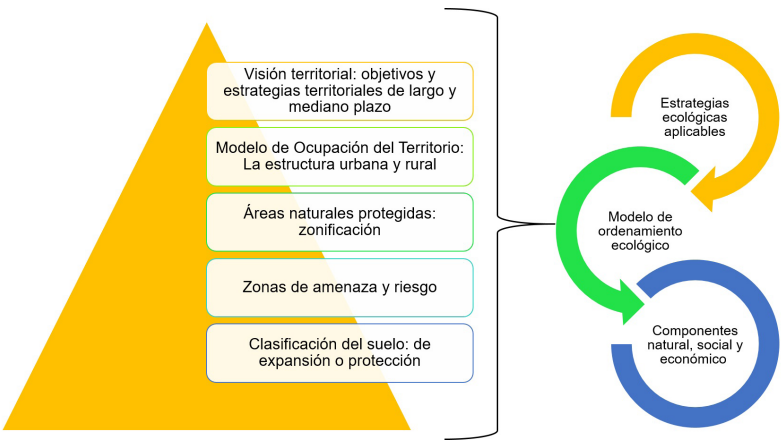


Fuente: Cámara de Comercio de Bogotá,

El POT se convierte en un instrumento de prospectiva, es decir, mediante el diagnóstico, se diseñan escenarios futuros de uso sostenible coordinado con el suelo para garantizar áreas estratégicas. Por ello, este documento plantea la necesidad del ordenamiento ecológico territorial (en adelante OET), para lograr la articulación dentro de la metodología y la definición de áreas estratégicas de ecología y biodiversidad, hidrología y usos del agua, que garanticen

el cuidado de uso y vocación del suelo, esto dentro de un marco de los ejes de planeación del ordenamiento (Figura 3).

Figura 3. Ordenamiento ecológico del territorio. Integración entre el POT y el OET



Fuente: elaboración propia.

1. El ordenamiento del territorio a escala local (OET)

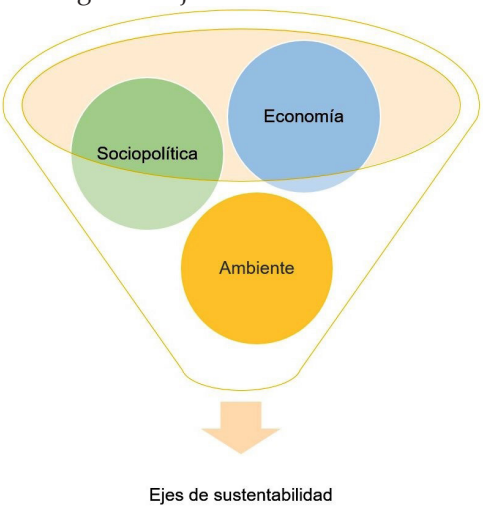
El proceso de ordenar el territorio, integra el diseño de estrategias que confieren lineamientos, para el caso de OET se hace necesario la creación de indicadores que den cuenta de los posibles cambios o trayectorias que se visionan en los procesos ecológicos y sociales mediante una metodología de presión, estado, impacto y respuesta. La creación de áreas estratégicas participativas se convierte entonces, en una hoja de ruta que podría lograr una gestión integrada de los recursos naturales renovables y de especial atención el agua y suelo.

En este contexto del territorio es necesario establecer la capacidad de respuesta del socio ecosistema, para potenciar sus servicios ambientales que desde el proceso participativo social se delimite una visión al corto y largo plazo, desde un posicionamiento táctico. Es decir, construir consensos en torno a objetivos para diagnosticar, evaluar y dar seguimiento a los resultados. La Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) (2014) reitera la importancia de la gestión integral en la biodiversidad y sus servicios ecosistémicos para la resiliencia socioecológica en las escalas nacional, regional y local.

De este modo, se reconoce la necesidad de articular la ciencia, tecnología e innovación, para establecer caminos, protocolos y metodologías que logren o den cuenta de la necesidad del manejo del capital natural (visto desde un enfoque sistémico). Es por ello que el departamento del Cauca, de acuerdo con el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2007) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (s.f.), realizaron un estudio donde se expone que en la región Caucana, se presentan parches productivos en las zonas centro y norte. Dicha situación es de especial atención, debido a la capacidad de carga y sobrecarga que recae sobre los recursos naturales allí disponibles, por ello se requiere de un OET para la destinación de suelos con vocación de protección ambiental.

La producción agrícola del departamento es de suma importancia socioeconómica, dado que los sistemas agropecuarios representan un gran peso en la economía de la región. Cultivos de ciclo corto, anuales, incluso los del mediano plazo, son una razón para establecer una propuesta de acción reactiva y preventiva para la población y los tomadores de decisiones. La intervención comunitaria cumple en este esquema del OET, un papel clave debido a la presencia de territorios indígenas en el Cauca. De acuerdo con el (DNP, 2011; Instituto Geográfico Agustín Codazzi, s. f.), la región posee 7,3% de uso del suelo para tierra arable para el desarrollo agropecuario. Ante estos escenarios, la planificación ecológica del territorio desde un OET estará enmarcada desde los ejes de la sustentabilidad, lo que permite en un primer momento establecer las dimensiones para la planeación estratégica articulada (Figura 4).

Figura 4. Ejes de la sustentabilidad



Fuente: elaboración propia.

Al analizar estos aspectos, se plantea la creación de un protocolo que acompañe el marco legal del ordenamiento territorial en Colombia, y al proponer la articulación del OET en conjunto con el POT, se podría potenciar desde los contextos educativos y poner en práctica los modelos y sistemas teóricos propuestos por científicos e investigadores que determinan hallazgos para dar respuesta a problemáticas en escenarios reales en la planificación territorial y las aristas que lo conforman. No se puede desconocer la transformación de los nuevos modelos de educación académica y de interacción social, ya que las comunidades derivan su metabolismo rural y urbano en la integración de las dimensiones anteriormente descritas.

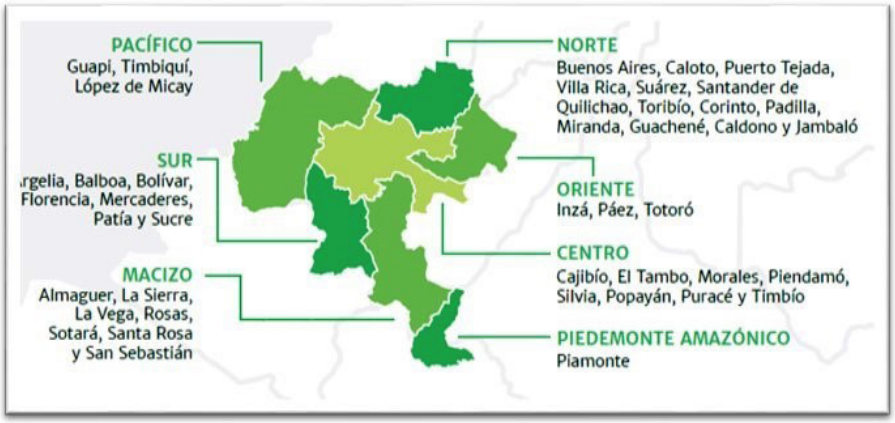
De esta manera, la propuesta del Ordenamiento Ecológico Territorial, en adelante (OET), se articula con el actual plan de gobierno nacional: Colombia potencia mundial de la vida por consiguiente, la naturaleza del ordenamiento ecológico territorial es enfocarse de manera prioritaria y especial en: estrategias ecológicas aplicables, modelo del territorio y sus componentes natural, social y económicos encaminados a un monitoreo integrado del ambiente, para al final construir una visión compartida para difundir su conocimiento.

Una preocupación de los gobiernos de hoy, se basa en el cumplimiento de la agenda 2030, en relación con los objetivos del desarrollo sostenible y de la misma manera al año 2050, donde se plantea una resiliencia climática socioecológica.

Proponer un OET, es poder comprender la red de interacciones y los componentes requeridos para la toma de decisiones y políticas públicas, con el fin de lograr una base sólida y articulada para la gestión integrada del riesgo desde un contexto que permita hacer frente a los eventos derivados por el cambio climático. Por lo tanto, deberá estar enfocado en establecer el tipo de acciones y manejos que se tendrán para el ordenamiento del territorio integral, dentro de un marco normativo en el cual se puedan ejecutar programas, proyectos y acciones estratégicas.

En este contexto, las regiones presentes en el departamento del Cauca, establecen una línea base de los elementos y dimensiones, con los cuales se cuenta en términos de municipios en cada una de las subregiones que representan a su vez, un marco de lineamientos para hacer posible una planificación del territorio en un marco ecológico para la reducción de la vulnerabilidad (Figura 5).

Figura 5. Subregiones departamento del Cauca



Fuente: DANE 2016.

2. Esbozo conceptual y teórico para el ordenamiento ecológico territorial en Colombia: OET desde los compromisos de la agenda 21

A nivel internacional Colombia, ha adquirido compromisos ambientales internacionales y en este contexto se hace necesario destacar cómo el OET se puede modelar (al igual que el POT) dentro de las líneas sociales y económicas establecidas en la Agenda 21. Reviste importancia pues la desde lo referido por (Huertas, 2020; Moreno y Rojas, 2013) se establecen los ejes con avances para dar cumplimento en los tratados y políticas del orden global a nivel agrícola, pecuario y ambiental.

Dicha información, permite establecer la necesidad para el departamento del Cauca, Colombia y el orden global para poder articular los procesos aportando soluciones sostenibles a problemáticas sobre el manejo de los recursos naturales, la degradación del medio ambiente, el manejo de la producción agropecuaria, pero, sobre todo, la capacidad de trabajar con estrategias de prevención que contribuyan al desarrollo sostenible de las regiones. Dentro de los lineamientos se encuentran (Cuadro 1).

Cuadro 1. Conservación y gestión de los recursos para el desarrollo de la agenda 21.

Ejes	Avances	Fuente
Protección de la Atmosfera	"Adopción e implementación del Protocolo de Montreal y sus enmiendas. Aprobación del documento CONPES 3700 que reconoce la necesidad urgente de emprender medidas adecuadas de adaptación y mitigación estableciendo el marco dentro del cual estas serán generadas. Proceso de formulación del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático. Formulación de la Estrategia Nacional para la Reducción de las Emisiones debidas a la Deforestación y la Degradación Forestal en los Países en Desarrollo".	(Huertas, 2020)
	"Con la expedición de la Ley 1454 de 2011 Ley Orgánica de Ordenamiento Territorial, el país define las bases y el marco institucional para el ordenamiento regional, fortalece la organización del Estado, la descentralización de funciones y la concertación de políticas entre la Nación y las Entidades Territoriales. Asimismo, favorece las estructuras asociativas en el territorio como son las Regiones como Entidades Territoriales y las Entidades Territoriales Indígenas".	(Huertas, 2020)
Enfoque integral de la Planificación y la Ordenación de los Recursos de Tierras	"En 2011, se especializa el organismo rector de la política ambiental desconcentrando algunas funciones como son la evaluación y seguimiento de las licencias ambientales de proyectos de desarrollo de interés nacional a cargo de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA, así como la Unidad Administrativa Especial Parques Nacionales Naturales encargada de administrar el Sistema de Parques Nacionales Naturales y coordinar el Sistema Nacional de Áreas Protegidas".	(Moreno y Rojas, 2013)
Lucha contra la Deforestación	"Se ha gestionado la expedición de políticas y planes orientados a la conservación y manejo sostenible de los bosques, entre ellos: la Política de Bosques, el Plan Nacional de Desarrollo Forestal (PNDF), el Plan Nacional de Prevención, Control de Incendios Forestales y Restauración de Áreas Afectadas y el CONPES 3700 de 2011: Estrategia Institucional para la Articulación de Políticas y Acciones en Materia de Cambio Climático en Colombia".	(Moreno y Rojas, 2013)
	"En el marco de la producción sostenible, se proponen como sistemas de aseguramiento de la inocuidad, calidad, las buenas prácticas agrícolas, consideradas como el conjunto de prácticas para el mejoramiento de los métodos convencionales de producción agrícola, haciendo énfasis en la inocuidad del producto, en lograr un menor impacto de las prácticas de producción sobre el ambiente y sobre la salud de los trabajadores y de los consumidores".	(Moreno y Rojas, 2013)
Fomento de la agricultura y del desarrollo rural sostenible	"Sello de Alimento Ecológico como un mecanismo de diferenciación entre este tipo de productos y los convencionales	(Moreno y Rojas, 2013)
	"Resolución 1023 de 2005 adopción de guías ambientales como instrumento de autogestión y autorregulación en algunos sectores productivos y de consulta y referencia de carácter conceptual y metodológico tanto para las autoridades ambientales como para el sector regulado, de manera tal que se cuente con criterios unificados para la planeación y el control ambiental de los proyectos, obras o actividades".	
	"CONPES 3375 de 2005: Política Nacional de Sanidad Agropecuaria e Inocuidad de Alimentos para el Sistema de Medidas Sanitarias y Fitosanitarias; CONPES 3376 de 2005: Política Sanitaria y de Inocuidad para las Cadenas de la carne bovina y leche; CONPES 3458 DE 2007Política Sanitaria y de Inocuidad para la Cadena porcícola; CONPES 3468 DE 2007 Política Nacional de sanidad e inocuidad para la cadena avícola; CONPES 3514 de 2008 Política Nacional Fitosanitaria y de Inocuidad para las cadenas de frutas y de otros vegetales".	(Moreno y Rojas, 2013)
	"Adopción de la Política Nacional de Producción y Consumo Sostenible". "Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (2010)". "El MADS adelanta un proyecto para la formulación de la Política de Gestión Integral Ambiental para el Recurso Suelo".	(Moreno y Rojas, 2013)
	"Ley 165 de 1994, Por medio de esta ley se aprueba el "Convenio sobre la Diversidad Biológica" para Colombia".	
Conservación de la Diversidad Biológica	"Formulación e implementación de la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos".	(Moreno y Rojas, 2013)

Ejes	Avances	Fuente
Gestión Ecológicamente racional de la biotecnología	"El ICA es responsable de formular programas dirigidos a garantizar la inocuidad de los productos de origen agropecuario, bajo el enfoque preventivo de la aplicación en la producción primaria y de lograr la inocuidad en la producción primaria de alimentos para consumo humano y como respuesta al proyecto misional "Diseño y puesta en marcha de un Sistema de Supervisión y Certificación de la Inocuidad en la Producción Primaria de Especies Priorizadas" a través de las buenas prácticas agrícolas (BPA) y buenas prácticas pecuarias (BPP)".	(Moreno y Rojas, 2013)
	"El ICA cuenta con un sistema de registro de plaguicidas de uso agrícola el cual se soporta en la normativa de la CAN (Decisión 436) y la Resolución 3759 de 2003. Para los plaguicidas de uso pecuario en la Resolución 1056 de 2010".	(Moreno y Rojas, 2013)
Protección de la calidad y el suministro de los recursos de agua dulce	"Formulación e implementación de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) Programa Nacional de Monitoreo del Recurso Hídrico, como herramienta de evaluación y seguimiento al estado del recurso hídrico a nivel nacional y regional, a través del diseño de metodologías y protocolos estandarizados. El Plan Hídrico Nacional desarrolla las líneas de acción estratégicas de la PNGIRH se encuentra en etapa de implementación de proyecto priorizados hasta el 2014 y con un horizonte en el mediano plazo para el desarrollo de los 10 programas que incluye el Plan. El Comité Técnico Nacional integrado por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, el IDEAM, el Servicio Geológico Colombiano, el viceministerio de Agua, las Autoridades Ambientales, la Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá y Sede Medellín), Universidad Industrial de Santander, Universidad de los Andes y Asociación Colombiana de Hidrogeólogos han formulado el Programa Nacional de Aguas Subterráneas, el cual constituye el instrumento rector de la gestión sostenible de este recurso en el país, fortaleciendo la capacidad institucional, la implementación de medidas de protección, la prevención de la contaminación y el aprovechamiento sostenible del mismo".	(Huertas, 2020)

Nota. Adaptación de Huertas, 2020 y Moreno y Rojas, 2013.

Por otro lado, en lo que corresponde al convenio de diversidad biológica, se establecen de igual manera los ejes y avances en estos componentes. Es decir, conservación y utilización sostenible de la diversidad biológica, Conservación *in situ*, Conservación *ex situ* y el pago por servicios ambientales por medio de los incentivos. Para este apartado, de acuerdo con (Moreno y Rojas, 2013), es necesario de igual manera, un plan como instrumento eficaz que en este caso se lograría consolidar desde el OET, para lograr un mecanismo de minimización de impactos y tensores ambientales asociados a la pérdida y transformación del ecosistema, es decir una visión socioecosistémica (Cuadro 2).

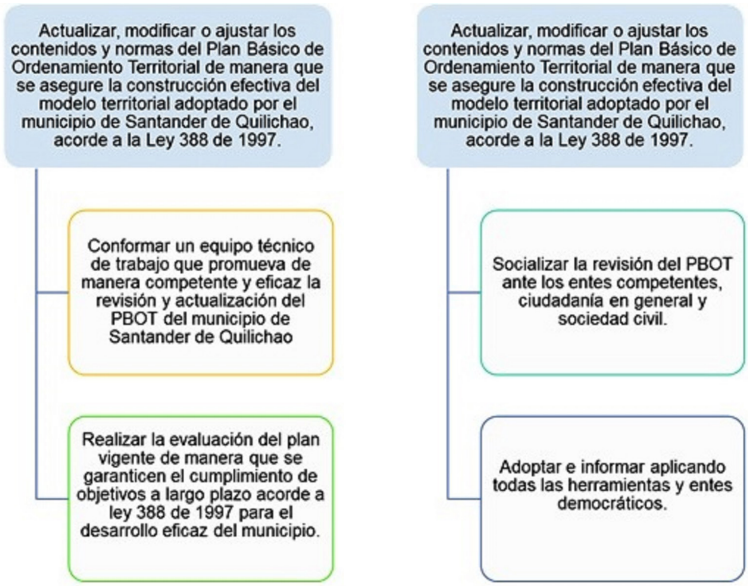
Cuadro 2. Ejes y Avances en el Convenio de Diversidad Biológica

Ejes	Avances
Conservación y utilización sostenible de la diversidad biológica	"Caracterización y generación de una línea base de monitoreo de los ecosistemas de la nación. Generación del sistema cartográfico —Ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombial, escala 1:500.000; se convierte en el primer mapa de ecosistemas realizado con una metodología concertada entre varias instituciones del Sistema Nacional Ambiental SINA. Plan Nacional para la conservación, recuperación y manejo sostenible de las especies migratorias de la biodiversidad colombiana. Ministerio de Ambiente 2009. Generación de informes anuales sobre el estado de la biodiversidad en Colombia a cargo del Instituto Humboldt. Política Nacional de Biodiversidad 1995, la cual ha sido actualizada en la Política de Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos PGIBSE. Ministerio de Ambiente 2011. Políticas que incluyen enfoques ecosistémicos: Plan Nacional de Desarrollo Forestal (2000) Política Nacional Ambiental para el Desarrollo Sostenible de los Espacios Oceánicos y las Zonas Costeras e Insulares de Colombia (2000). Aplicación de las Evaluaciones Ambientales Estratégicas y los incentivos para el uso sostenible de la biodiversidad". "Plan de Acción del SINAP como instrumentos de planeación regional, desarrollaron los ejes temáticos del plan de acción nacional que permiten una planificación integral y completa del sistema nacional de áreas protegidas. Plan Estratégico para la Restauración y el Establecimiento de Bosques en Colombia (Plan Verde). Ministerio de Ambiente. 2000 Plan Nacional de Restauración, Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Disturbadas, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2010".
Conservación in situ	"Lineamientos de gestión ambiental de fauna silvestre en Colombia. Ministerio de Ambiente 1996. Consolidación de libros Rojos de especies amenazadas en Colombia. El Programa de Recursos Vegetales del convenio Andrés bello (PRECAB) está orientado las especies vegetales nativas".
Conservación ex situ	"Programa Nacional de Conservación ex situ para Zoológicos y Acuarios. Ministerio de Ambiente. 1997. Estrategia Nacional para la Conservación de Plantas. Instituto Alexander von Humboldt. 2010. *Plantea la necesidad de un gran esfuerzo y concertación institucional en la gestión ante la introducción de especies exóticas, la conservación por fuera de las áreas protegidas, la conservación ex situ y las estrategias intersectoriales".
Incentivos	"Estrategia Nacional de Pago por Servicios Ambientales, definida por el Ministerio de Ambiente en 2008. Plan Estratégico Nacional de Mercados Verdes. Ministerio de Ambiente. 2002".
Investigación y Capacitación	"Creación de cinco Institutos de investigación –que aportan al conocimiento de la biodiversidad y el estado de los recursos naturales-(Instituto Alexander von Humboldt (IAvH) para la biodiversidad continental; Instituto de investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR); Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-(IDEAM), nodo principal de la información ambiental del país; Instituto Amazónico de investigaciones Científicas (SINCHI); y el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacifico, además de la Unidad Administrativa de Parques Nacionales de Colombia (UAESPNN). Aproximación integral a la definición de prioridades de conservación de especies. A cargo del Instituto Humboldt en el marco de un proyecto de capacitación con el ICFES. Sistema de Información en Biodiversidad SIB".
Investigación y Capacitación	"Creación de cinco Institutos de investigación –que aportan al conocimiento de la biodiversidad y el estado de los recursos naturales-(Instituto Alexander von Humboldt (IAvH) para la biodiversidad continental; Instituto de investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR); Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-(IDEAM), nodo principal de la información ambiental del país; Instituto Amazónico de investigaciones Científicas (SINCHI); y el Instituto de Investigaciones Ambientales del Pacifico, además de la Unidad Administrativa de Parques Nacionales de Colombia (UAESPNN). Aproximación integral a la definición de prioridades de conservación de especies. A cargo del Instituto Humboldt en el marco de un proyecto de capacitación con el ICFES. Sistema de Información en Biodiversidad SIB".
Evaluación del impacto y reducción del impacto adverso	"Evaluación de Impacto Ambiental, Planes de Manejo Ambiental y Guías ambientales, son instrumentos que desde la legislación colombiana se relacionan con el seguimiento ambiental y el licenciamiento de proyectos sectoriales por parte del Ministerio del Medio Ambiente. Con esquemas de presentación de la información en unos términos de referencia que contemplan la biodiversidad".
Acceso a los recursos genéticos	"Aproximación al conocimiento de la diversidad genética a través de los contratos de acceso a recursos genéticos concedidos por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para investigación o para bioprospección. Entre 2004 y 2011, se han firmado 45 contratos de acceso, todos con fines de investigación. De estos contratos, 19 han sido para el acceso al material genético de más de una especie. El resto se encuentran repartidos en 16 especies de fauna, 7 de flora y 1 microorganismo (MAVDT, 2011)".

Fuente: Moreno y Rojas, 2013.

Propuesta del ordenamiento ecológico territorial, en el municipio de Santander de Quilichao, Cauca, Colombia (Figura 6).

Figura 6. Plantilla de la propuesta OET



Fuente: elaboración propia.

3. Metodología

Con el fin de cumplir con los objetivos propuestos, se han definido 8 fases, las cuales incluyen eventos de participación democrática y eventos técnicos que serán llevados a cabo por el equipo consultor que estarán descritos en la fase 1 y en el respetivo presupuesto. De acuerdo con Baró Suarez y Monroy Gaytán (2018), los riesgos socionaturales son elementos clave para la construcción de la planificación territorial.

Fase 1. Organización equipo técnico municipal

La puesta en marcha del POT, dependerá de la asignación desde la administración municipal, de tal manera que se debe crear una mesa sectorial e interdisciplinar de trabajo que garantice el desarrollo del proceso metodológico.

Para esto, el grupo consultor propone la conformación de un grupo coordinador y un grupo técnico de trabajo, los cuales tendrán la siguiente conformación:

a. Grupo Coordinador: Presidido por el Alcalde o su delegado (persona de la administración municipal encargada de los temas relacionados con planeación), la autoridad ambiental respectiva, la secretaria de planeación, sector productivo, representantes de ONG'S encargado del grupo técnico de trabajo.
b. Grupo Técnico de Trabajo: Este eje se caracteriza por contar con una mesa de trabajo interdisciplinaria en: ingeniería, contexto social, planificación y administración pública, economía y finanzas, el grupo estará encargado de programar, organizar y ejecutar el trabajo técnico requerido para la revisión y actualización del PBOT. De igual manera se deberá elegir un encargado de este grupo.

Fase 2. Evaluación del plan vigente

La vigencia del POT de acuerdo con la norma (Congreso de la República, 1997, Ley 388) es de tres períodos constitucionales. Este lineamiento expone entonces que se debe hacer la revisión del plan para dar continuidad al proceso de acuerdo con los informes técnicos generados por administraciones anteriores o activar, de ser el caso, la construcción del mismo. En el caso del municipio de Santander de Quilichao, no existen ajustes actualmente al último informe realizado durante el período de gobierno del 2001.

En esta fase se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- De acuerdo con la situación actual del territorio en el municipio, se deben acotar los lineamientos legales y que soportados en la norma, deben ser acogidos de no estar formulados. Por ello es necesario construir o completar la información para el POT y el OET.
- Generar información confiable cartográfica y aplicar aquellos aspectos normativos que sean necesarios de actualización en conjunto con los procesos de georreferenciación con indispensables para analizar áreas potenciales del municipio para la gestión del riesgo socionatural.
- Integrar al POT y OET aquellos proyectos y planes que hacen parte de la hoja de ruta del municipio, como el caso de agendas ambientales, prestación de servicios públicos, así como los lineamientos regionales para los planes operativos.

Por otro lado, se deberán incluir otros aspectos:

- Crear espacios de diálogo entre comunidades vecinas de la región, con el fin de garantizar procesos de planificación integral, que garanticen un proceso armónico social, económico y ambiental.
- Establecer de manera clara y precisa los lineamientos a seguir para la construcción del POT y el OET en el corto plazo, detallando las actividades a realizar dentro de la planificación ecológica del territorio.
- "Esta revisión implica evaluar el cumplimiento del mismo, y la reprogramación de los proyectos no llevados a cabo, en concordancia con lo establecido en el Plan de Desarrollo de la nueva administración" (Alcaldía Municipio de Baranoa, 2008).
- Definir estrategias de planificación integrada, que logren el cumplimiento de objetivos, esto a su vez implica entonces el manejo del paisaje, el suelo de expansión, suelo de protección y aquellos procedimientos que permitan la elaboración del OET.
- Definir las estrategias ecológicas territoriales de largo y mediano plazo, para planificar el modelo de ocupación del territorio municipal y su integración regional. Es importante en este caso, tener las rutas municipales dispuestas para procesos tales como: acueducto y alcantarillado, aseo, servicios de transporte, permisos y licencias para usos del suelo, de igual manera con el uso del espacio público.
- La zonificación de áreas de importancia ambiental, para el caso de Santander de Quilichao, reviste importancia por la presencia en el territorio de la reserva natural Munchique los Tigres, en donde se encuentra la unidad de manejo de cuencas (UMC), de la cual hace parte el río Quilichao, afluente que presta el servicio ecosistémico de abastecimiento. El OET planteado en este estudio, se convierte entonces en un plan estratégico para los bienes y servicios ambientales presentes en el municipio, a fin de lograr un modelo de ordenamiento ecológico convertido en política pública para los compontes naturales.
- La elaboración de atlas de riesgo es una pieza clave en la delimitación de zonas expuestas y vulnerables, por lo tanto, se debe enmarcar en el cumplimento de la Ley para la planeación urbanística y paisajística.
- Finalmente, la integración sectorial tanto pública como privada, es clave dentro del proceso del OET, asimismo, dar a conocer los lineamientos para la inclusión de actores académicos para las mesas técnicas que se crean dentro del plan.

Fase 3. Consideración del consejo de gobierno municipal

Esta fase, contempla el inicio o acta de compromiso de la administración municipal como gobierno local; por ello, se establece el papel fundamental que cumple el Consejo de Gobierno para tener voz y voto dentro del proceso del OET.

Fase 4. Consideraciones técnicas de revisión

El equipo técnico encargado, tendrá una alta responsabilidad para crear la información requerida en la construcción y/o actualización del POT en conjunto con el OET. Una vez conformado, se dará un aval de acción que establezca el inicio del plan.

Se actualizará la información que concierne a los documentos que soporten como acta de inicio del plan, información cartográfica disponible, en la cual se integren los componentes y dimensiones para el recurso suelo y sus lineamientos considerados en el POT y OET.

- La revisión por parte de la autoridad ambiental, en este caso la Corporación Autónoma Regional del Cauca (CRC), para dar validez a la información y también dar a conocer los instrumentos dispuestos para tal fin, soportados con la documentación requerida para la valoración de estos.
- La secretaria de planeación municipal, estará encargada de la revisión del documento del PTO y el OET. Este espacio es de alta importancia ya que se gestan procesos entre los equipos y actores involucrados en la creación, formulación o actualización del plan.

Fase 5. Socialización

La divulgación es indispensable y necesario, de igual manera un documento público que podrá ser consultado por la comunidad o cualquier actor interesado. Puesto que sobre éste se toman decisiones de los diversos componentes contemplados en el plan. Los canales de comunicación serán abiertos para los diversos sectores, así como los grupos sociales, dentro del proceso de socialización, antes de ser elevado a la autoridad ambiental CRC.

Fase 6. Presentación consejo municipal

Una vez recibidas los ajustes a los que haya lugar por parte de la secretaria de planeación municipal y la autoridad ambiental, se presentará el documento

finalizado para la revisión por parte del Consejo Municipal, en caso de no tomarse alguna decisión podrá ser adoptado por decreto de la alcaldía.

Fase 7. Adopción

Al ser aprobado, se pasa a la adopción del plan, donde se entrega un documento completo y compilado; en este podrán reflejarse los artículos aprobados y los modificados, mediante decreto, se dará paso a la adopción y aplicación.

Fase 8. Información a entes territoriales

Una vez finalizado el proceso del POT y OET es obligatorio cumplimento comunicar al gobierno regional y a la autoridad ambiental CRC, de acuerdo con las disposiciones también ante el Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial sobre la construcción de un nuevo plan de ordenamiento ecológico territorial OET enmarcado en el POT.

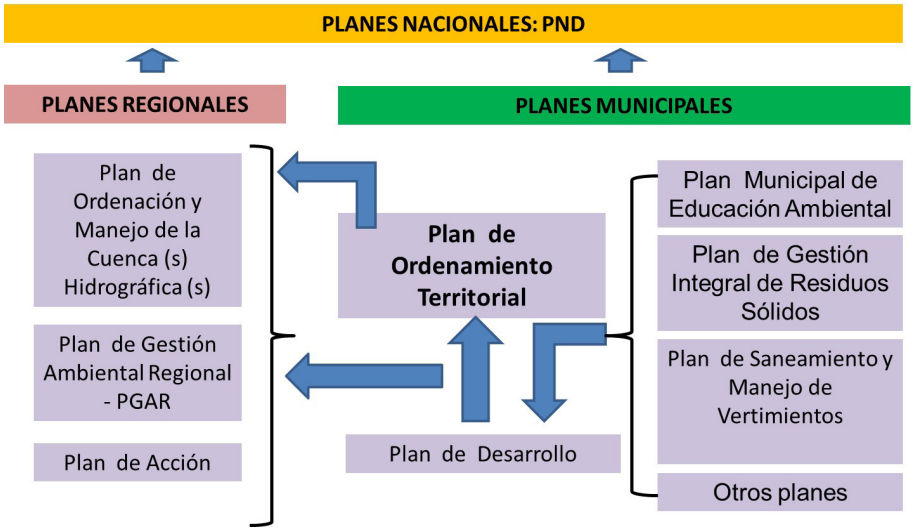
Conclusiones

- Se hace necesario abordar tres estrategias fundamentales: 1. Conocimiento del riesgo. 2. Reducción del riesgo. 3. Manejo del desastre.
- Necesidad de que, a partir de analizar qué tan adecuado tiene el municipio abordado el conocimiento de los riesgos, se destinen en esa medida recursos para ello.
- Hay que recordar que es pertinente realizar la restitución cartográfica de cabeceras municipales (urbano) y de las zonas rurales.
- Tener en cuenta el marco conceptual que viene difundiendo la CVC para la presentación cartográfica de las evaluaciones de amenazas y riesgos y su incorporación al OT.
- Revisar las áreas de expansión urbana propuestas en el OT, en el sentido de verificar si tienen o no soporte en el tema de amenazas, de lo contrario es indispensable asignar recursos para ello.
- Recordar la necesidad de cumplir los compromisos de las concertaciones del OT en el tema de las amenazas y riesgos, asignación de recursos de acuerdo con prioridades.
- El Decreto-Ley 0019 del 10 de enero del 2012 (antitrámites) precisa: Art 189: Incorporación de la gestión del riesgo (GIR) para ser incluida en la revisión del POT. Para el OET será imperativo la consideración de las áreas expuestas y vulnerables, de acuerdo con la norma, se realizará la revisión de los contenidos de mediano y largo plazo del POT o la expedición del nuevo POT cuando se realice y garantice la delimitación, geolocalización y posterior zonificación de las áreas de amenazas y

las áreas en condiciones de riesgo, para establecer así los procesos de mitigación y adaptación.

- Necesidad de fortalecer los CLOPAD´s en el entendido de priorizar gestión preventiva y "borrar el *casete* de una gestión solo reactiva ante el desastre, o la afectación".
- El PND define como meta que los municipios de Colombia deben tener sus Planes Municipales de Gestión del Riesgo; algunos municipios del Valle, del orden de 16, ya recibieron asesoría y asistencia desde la Dirección de Gestión del Riesgo (DGR) y del Ministerio del Interior y de Justicia (MIJ).
- Necesidad de que los municipios que tengan obras de prevención y mitigación revisen el estado de las mismas a efecto de asignar recursos para su mantenimiento, recuperación y reforzamiento, sin reconstrucción de las vulnerabilidades.
- Necesidad de que los municipios se apersonen y realicen gestión adecuada, *lobby*, ante Colombia Humanitaria para lograr que el Fondo de Adaptación asigne los recursos para los proyectos postulados.
- Recordar al municipio que en su OT y bajo otros actos administrativos se han declarado zonas de alto riesgo, luego el municipio, ni el Estado en cualquiera de sus figuras, puede realizar inversión en esas zonas, diferente a la reubicación.
- Hay que recordar que la microzonificación sísmica no es una exigencia para todas las cabeceras municipales, es obligatorio para las que tienen 100.000 habitantes o más y están en amenaza sísmica media o alta.
- El riesgo es posible reducirlo, no esperar a que reviente, porque entonces estamos frente al desastre.
- Finalmente, la necesidad de que el municipio conciba una gestión de gobernabilidad y autoridad con los organismos competentes para el control de la ocupación indebida del territorio, que es la que más incuba riesgos y luego los desastres (Figura 7).

Figura 7. Articulación de los planes de desarrollo nacional a nivel local y regional



Fuente: elaboración propia

Bibliografía

Alcaldía Municipio de Baranoa (2008). *Memoria justificativa, seguimientos y evaluación: Plan básico de ordenamiento territorial 2008-2019*. https://tinyurl.com/2dgol7xp

Baró Suarez, J. E., y Monroy Gaytán, F. (Coordinadores) (2018). *Enfrentando los riesgos socionaturales* (1.a ed.). Clave editorial-AM Editores. http://hdl.handle.net/20.500.11799/95387

Congreso de la República (1997). *Ley 388 de 1997, por la cual se modifica la Ley 9 de 1989 y la ley 2 de 1991 y se dictan otras disposiciones*. Diario Oficial 43091. https://tinyurl.com/y3xzkvf3

DNP (2007). Plan Nacional de Desarrollo 2006-2010. *Estado comunitario: Desarrollo para todos, Tomo I*. Departamento Nacional de Planeación. https://colaboracion.dnp.gov.co/cdt/pnd/pnd_tomo_1.pdf

DNP (2011). *Plan Nacional de Desarrollo 2010-2014*. Departamento Nacional de Planeación.

FAO (2014). *Políticas agroambientales en América Latina y el Caribe: Análisis de casos de Brasil, Chile, Colombia, México y Nicaragua (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura)*. Oficia Regional de la FAO para América Latina y el Caribe. https://tinyurl.com/23wt9amy

Huertas Martin, A. M. (2020). M*odelos de gestión idóneos para impulsar el desarrollo sostenible y competitivo de los agricultores del departamento de Boyacá.* Tesis Especialización, Universidad Nacional Abierta y a Distancia. https://tinyurl.com/22d6oguf

Instituto Geográfico Agustín Codazzi (s. f.). *Cauca no debería basar su economía en el uso agropecuario de sus tierras. Colombia Potencia de la Vida*. https://tinyurl.com/2dzuuheg

Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio de Colombia (2023). *Plan de Ordenamiento Territorial* (POT). https://minvivienda.gov.co/viceministerio-de-vivienda/espacio-urbano-y-territorial/plan-ordenamiento-territorial/pot

Moreno, L. M., y Rojas Salazar, L. (Eds.). (2013). *Fortalecimiento de las políticas agroambientales en países de América Latina y el Caribe a través del dialogo e intercambio de experiencias nacionales, caso Colombia.* FAO. https://www.fao.org/3/as223s/as223s.pdf?cv=1

Bloque 2.
Recursos Hídricos

Capítulo 10. Indicadores de calidad y contaminación del agua

María Vicenta Esteller Alberich [1]
Edith Rosalba Salcedo Sánchez [2]
José Luis Expósito Castillo [3]
José Alfredo Flores Ronces [4]

Introducción

El agua es un recurso natural fundamental y un componente principal de los ecosistemas, ya que juega un papel vital en el desarrollo de la vida y la economía de varios sectores como la agricultura, la ganadería, las actividades industriales, la generación de energía hidroeléctrica, la pesca y otras actividades recreativas (Uddin *et al*., 2017). La disponibilidad y la calidad del agua, se han visto afectadas debido a diferentes factores naturales como antropogénicos (Magesh *et al*., 2013); entre los factores naturales destacan los elementos hidrológicos, atmosféricos, climáticos, topográficos y litológicos. Las actividades antropogénicas que más impactan negativamente en los recursos hídricos son: el aumento de la población, la industrialización, la urbanización, la erosión del suelo debido al cambio de uso del suelo, el aumento de la escorrentía de los sedimentos, la mala disposición de desechos (municipales, agrícolas e industriales), (Lobato *et al*., 2015) y la contaminación por elementos y compuestos tóxicos (Sánchez *et al*., 2007).

En los últimos años, los países en desarrollo se han enfrentado a grandes problemas para proteger la calidad del agua al tratar de mejorar su suministro y saneamiento (Kannel *et al*., 2007; Ortega *et al*., 2016; Uddin *et al*., 2021). Inclu-

1 Doctora en Ciencias Geológicas. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA)-Universidad Autónoma del Estado de México.

2 Doctor en Ciencias del Agua. Universidad Autónoma de Guerrero.

3 Doctor en Ingeniería. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA)-Universidad Autónoma del Estado de México.

4 Maestro en Ciencias. Universidad Autónoma de Guerrero.

so las naciones desarrolladas han estado luchando para mantener o mejorar el estado de la calidad del agua frente a problemas como la contaminación, la eutroficación, el aumento en el suministro de agua potable y la disposición de aguas residuales (Abbasi y Abbasi, 2012). La calidad del agua describe en concreto su condición, a través de sus características físicas, químicas y biológicas mostrando un panorama con respecto a su idoneidad para un propósito de uso particular (Samboni *et al*., 2007; Uddin *et al*., 2021).

La cantidad óptima y calidad aceptable del agua es una de las necesidades esenciales para la supervivencia de la humanidad, por lo que su mantenimiento de calidad aceptable es un desafío en el sector de la gestión de los recursos hídricos (Mladenović y Žerajić, 2017). Por tal razón, los que toman desiciones, las agencias gubernamentales, las universidades, las organizaciones ambientales y el público en general, se han preocupado por evaluar el impacto antrópico sobre los recursos hídricos a través del estudio de diferentes programas de monitoreo (Mukate *et al*., 2019).

La interpretación de los datos obtenidos en los monitoreos de calidad son tarea compleja y, en ocasiones, difícil abordar por los diferentes actores involucrados en el proceso de la valoración de la calidad del agua. Estos datos deben permitir resolver diferentes tipos de conflictos como pueden ser: la aptitud del uso del agua, la integridad ecológica de los sistemas acuáticos que a su vez involucran los aspectos socioeconómicos (Fernández y Solano, 2005).

Evaluar la calidad del agua a partir de los análisis de un número grande de parámetros, no es tarea fácil. Para facilitar esta complicada tarea de evaluación, integra una gran cantidad de parámetros en un solo valor compuesto para que sea fácil de comprender sin perder su base científica; este valor estaría representado por un índice de calidad del agua o de contaminación del agua (Samboni *et al*., 2007; Mukate *et al*., 2019). Los índices integran una formulación con varios parámetros, en su mayoría fisicoquímicos; algunos casos microbiológicos que permiten reducir la información a una expresión sencilla y fácil de entender. Estos parámetros pueden ser considerados como indicadores., por ello hay que tener en cuenta que:

Un indicador se define como la capacidad de un elemento para informar acerca de las condiciones y/o características de un determinado sistema. Los indicadores se refieren a medidas simples de parámetros o especies biológicas, bajo la hipótesis que estas medidas son indicativas del sistema biofísico o socioeconómico.

Un índice es la clasificación descriptiva de una gran cantidad de datos o información ambiental cuyo propósito principal es simplificar la información para que pueda ser útil a los que toman decisiones y al público en general. De esta manera, un "índice" es la jerarquización o, en general, una ordenación de "indicadores" que tiene por objetivo cuantificar una o un conjunto de características de un sistema en estudio, sin necesidad de abordarlo en su totalidad.

Actualmente, existen diferentes índices para evaluar la calidad medioambiental de los sistemas acuáticos, los cuales involucran hasta más de 30 parámetros, agrupados en diferentes categorías como: eutrofización, aspectos de salud, contaminación por materia orgánica e inorgánica, sustancias suspendidas y disueltas, nivel de oxígeno, características fisicoquímicas y sustancias disueltas, entre otras (Lumb, 2011; Mladenović y Žerajić, 2017; Uddin *et al*., 2021).

Este capítulo presenta una revisión de la literatura acerca de los diferentes índices utilizados en México y en diferentes partes del mundo; asimismo se expone un caso de estudio.

1. Antecedentes

El concepto de calidad del agua según su grado de pureza o contaminación, se remonta a 1848 en Alemania (citado por Lumb *et al*., 2011). Casi al mismo tiempo, se reconoció en el Reino Unido la importancia de la calidad del agua para la salud pública. El índice sapróbico (SI) es uno de los primeros trabajos desarrollados utilizado para evaluar fácilmente la carga orgánica degradable en las aguas que fluyen, considerando como base para la evaluación; e índices saprobios de diferentes organismos vivos. El SI fue utilizado en varios países europeos como Alemania, Dinamarca, Checoslovaquia, Hungría y el Reino Unido como una medida del nivel de contaminación orgánica (Lumb *et al*., 2011).

Los índices sapróbicos se determinaron mediante estudios empíricos. Con éstos se categorizan los cuerpos de agua en varias clases o niveles de contaminación. Este sistema de clasificación se encuentra deficiente a veces impráctico, por lo que la búsqueda de un índice de calidad continuó en las décadas siguientes, para tener un mejor sistema basado en un esquema de numeración (Samboni *et al*., 2007; Lumb *et al*., 2011).

Horton (1965) desarrolló un índice de calidad del agua que integra de forma matemática un sistema de números para calificar la calidad del agua. En este índice se contemplan parámetros físicos, químicos y biológicos significativos del agua de una manera simple pero científicamente defendible (Boyacioglu *et al*., 2007). Otro índice general desarrollado por Brown *et al*. (1970), fue mejorado por Deininger para la Academia Nacional de Ciencias de los Estados Unidos en 1975 (NAS, 1975).

En 1970, con la ayuda de la metodología *Delphi*, *The National Sanitation Foundation* (NSF) desarrolló un Índice de Calidad de Agua (ICA) (WQI por sus siglas en inglés) con base en nueve parámetros: DBO5 (Demanda Bioquímica de Oxígeno), OD (Oxígeno Disuelto), coliformes fecales, nitratos (NO_3^-), nitrógeno total, pH, temperatura, Sólidos Disueltos Totales (SDT), fósforo total y turbidez (NSF, 2006). Actualmente es uno de los índices más utilizados por agencias e instituciones en los Estados Unidos. Estos índices desarrolla-

dos han proporcionado nuevas herramientas para potenciar las investigaciones sobre calidad de agua (Cude *et al*., 2001).

El desarrollo de los índices se diversificó durante la década de los noventa implementando varios índices específicos en cuencas o regiones; en 1995 se formuló un índice para evaluar la calidad del agua en el estado de Florida, a través de la Estrategia de Evaluación Ambiental de Florida (The Strategic Assessment of Florida´s Environment -SAFE), en 1996 dentro del marco del Programa de Mejoramiento de la Cuenca Baja de Miami, del Programa de Mejoramiento de la Cuenca Baja de Miami (WEP, 1996). En el mismo año, la Comunidad Europea implementó el índice universal con el objetivo de evaluar la calidad del agua superficial como fuente de agua potable (UWQI); este índice integra la evaluación, parámetros fisicoquímicos (nitratos, OD, DBO5, fósforo total, pH), microbiológicos (coliformes totales), metales y metaloides (cadmio, cianuro, mercurio, selenio, arsénico, fluoruro), en un total de 12 parámetros (Boyacioglu, 2007).

Los Países Bajos desarrollaron un índice de valoración ecológica y biológica de los sistemas acuáticos llamado AMOEBA, denominado así por sus siglas en inglés (A General Method of Ecological y Biological Assessment), este indice integra parámetros fisicoquímicos y biológicos en su evaluación, tomando en cuenta la normatividad y la biodiversidad (Fernández y Solano, 2005).

España adoptó un índice desarrollado para las provincias Lomantange y Provencher. Considerando su evaluación total de 23 parámetros, 9 básicos y 14 complementarios, incorporando los criterios enmarcados para diferentes usos de agua potable; recreación con contacto primario, riego y protección de la vida acuática. España, además del índice canadiense, tomó en cuenta en sus evaluaciones de calidad, el índice simplificado de calidad de agua (ISQA), que considera parámetros como la DQO (Demanda Química de Oxígeno), SST (Sólidos Suspendidos Totales), conductividad eléctrica y temperatura (Samboni *et al*., 2007).

Otro índice importante es el WQI de la Columbia Británica (BCWQI), desarrollado por el Ministerio de Medio Ambiente, Tierras y Parques, utilizando para evaluar el estado de calidad del agua de los cuerpos de agua en la provincia de Columbia Británica, Canadá (Saffran *et al*., 2001). Varios autores señalan que este índice (BCWQI) tiene una mayor sensibilidad frente al diseño de muestreo, una mayor dependencia de la aplicación específica de los objetivos de calidad del agua y es uno de los más sobresalientes por la teoría matemática en la cual se fundamenta (Samboni *et al*., 2011; Lumb *et al*., 2011; Udin *et al*., 2021, Said *et al*., 2004). El grupo de trabajo encargado de establecer las directrices de Calidad del Agua del Consejo Canadiense de Ministros de Medio Ambiente (CCME), desarrolló el CCME WQI en 2001 (Saffran *et al*., 2001), luego de una revisión del modelo BCWQI (Lumb *et al*., 2011).

Estos métodos no siguen ninguna técnica sistemática para seleccionar y establecer los parámetros a incluir; generalmente se eligen en función de problemas con mayor frecuencia en la calidad del agua, como son la disponibilidad de oxígeno, la eutrofización, las consideraciones de salud, los fenómenos físicos y químicos, los componentes disueltos; pero existen índices que consideran solo criterios generales y no emplean ningún parámetro peligroso, tóxico o radioactivo (Bilgin, 2018; Mahmood, 2018; Noori *et al*., 2018; Verma *et al*., 2019).

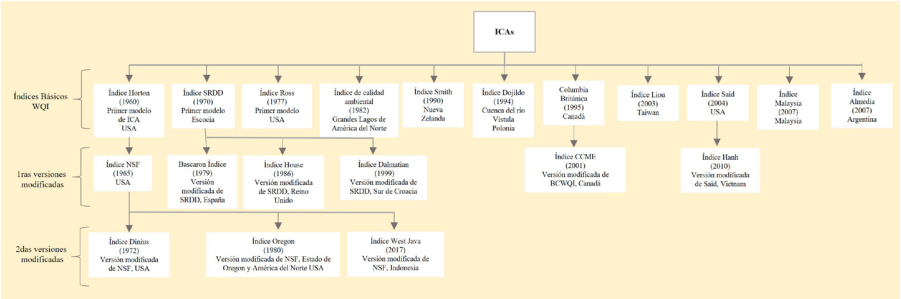
Prácticamente, estos índices incluyen al menos 3 parámetros: pH, OD, DQO ó DBO5, Nitrógeno total, fósforo total, sólidos totales (ST) y coliformes fecales. Algunos otros modelos como el índice de Oregón (Lumb *et al*., 2011), Dojildo, Liou (Liou *et al*., 2004), Almeida y West-Java recomiendan incluir detergentes, fenoles, pesticidas y elementos traza (Pb, Cu, Zn, Cd, Hg, Mn, Fe, etc.) para evaluar la calidad del agua (Uddin 2021).

Muchos de estos índices descritos se basan en métodos que consisten, en primer lugar, en una selección de parámetros para posteriormente realizar su transformación a una escala común (que se conocen como subíndices de los parámetros); una asignación de pesos ponderados a cada parámetro y, finalmente, una agregación a través de alguna ecuación (Horton, 1965; Abbasi y Abbasi, 2012; Studian *et al*., 2016). Por lo general, suelen ponderarse según la importancia percibida para la calidad general del agua o ser iguales (Vasanthavigar *et al*., 2010). En muy pocos índices la asignación de pesos es igual, por lo que en la mayoría de ellos la asignación de pesos es desigual, pues se considera que cada parámetro tiene su propia influencia en la calidad del agua (Horton, 1965; Stambuk-Giljanovic, 1999; Pesce y Wunderlin, 2000; Cude, 2001; CCME, 2001; Hallock, 2002; Sargaonkar y Deshpande, 2003; Liou *et al*., 2004; Tsegaye *et al*., 2006).

Hay que tener presente que la sensibilidad de un índice puede verse afectada por aquellos parámetros con una ponderación muy alta, por lo que se vuelve sumamente importante ponderar en función del uso del agua (riego, agua potable, vida acuática, etc.). Por lo tanto, un pequeño cambio en esta asignación de pesos afectará la interpretación general de la calidad del agua. Y, para mejorarla, se utiliza métodos tales como el Delphi y las diferentes técnicas de análisis multicriterio, generando los pesos relativos de los parámetros de forma más objetiva.

En la figura 1 se muestra un esquema resumen de la historia de los índices (Abbasi y Abbasi, 2012). Estos son de uso común, se consideran un número de variables entre 3 y 72.

Figura 1. Desarrollo histórico del modelo del índice de calidad del agua



Fuente: Uddin *et al*., 2021.

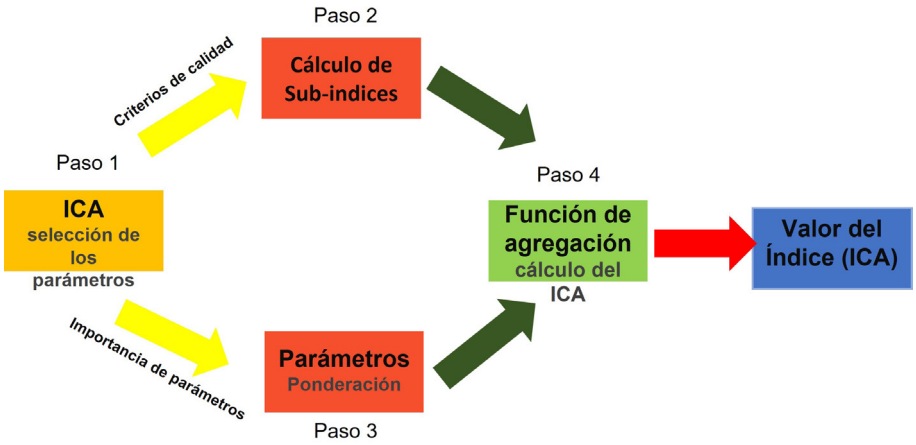
2. Estructura general de los índices de calidad

Un índice de calidad de agua consiste, fundamentalmente, en una ecuación simple de una combinación más o menos compleja de un número de parámetros, el cual sirve como expresión de la calidad del agua. El índice puede ser representado por un número, un rango, una descripción verbal, un símbolo o incluso un color (Fernández *et al*., 2005).

La estructura general de los modelos de índices de calidad se ilustra en la Figura 2 y muestra que la mayoría de ellos contienen cuatro pasos principales (Abbasi y Abbasi, 2012; Lumb *et al*., 2011; Sutadian *et al*., 2016), a saber:

1. Selección de los parámetros de calidad del agua: se seleccionan uno o más parámetros de calidad del agua para su inclusión en la evaluación.
2. Generación de los subíndices de los parámetros: las concentraciones de los parámetros se convierten a subíndices sin unidades mediante su conversión a una escala común.
3. Asignación de los valores de ponderación de los parámetros: se asignan ponderaciones (pesos) a los parámetros en función de su importancia para la evaluación de calidad del agua. En general, el valor del peso del parámetro se estima en función de la importancia relativa del parámetro de calidad del agua y/o los límites apropiados de calidad del agua (Sarkar y Abbasi, 2006). La mayoría de estos modelos aplican técnicas de ponderación desigual, donde la suma de todos los valores de ponderación de los parámetros es igual a 1.
4. Cálculo del índice de calidad del agua usando una función de agregación: los subíndices de parámetros individuales se combinan usando las ponderaciones para dar un índice general único. Hay que definir una escala de calificación que se utiliza para categorizar/clasificar la calidad del agua con base en el valor del índice.

Figura 2. Estructura general de un índice de calidad del agua



Fuente: Uddin *et al.*, 2021.

3. Resumen de las estructuras de los modelos más comunes de índices

A continuación, en el cuadro 1, se resumen la estructura y detalles de los modelos más comunes y representativos de los índices de calidad del agua.

Cuadro 1. Modelos de índices y sus características principales

Modelos	Componentes del modelo				
	Nº de parámetros y proceso de selección	Procedimiento de sub-indexación	Ponderación de parámetros	Técnicas de agregación	Escala de calificación
Índice Horton (1960)	• 8 parámetros • Importancia de los parámetros y disponibilidad de datos	Valor de parámetros utilizado como valor del subíndice y rangos de subíndice de 0 a 100	Sistema fijo y desigual (4 para OD y 1 para otros parámetros)	Usa la función matemática aditiva $WQI = \left[\frac{w_1 s_1 + w_2 s_2 + w_3 s_3 + \cdots + w_n s_n}{w + w_2 + w_3 \cdots\cdots + w_n}\right] m_1 m_2$ $BrownWQI = \sum_{i=1}^{n} w_i s_i$	Cinco categorías - Muy bueno (91–100) - Bueno (71–90) - Pobre (51–70) - Malo (31–50) - Muy malo (0–30)
Índice NSF (1965)	• 11 parámetros • Método Delphi	• Calidad del agua usada como estándar. • La escala varia de 0 a 1; cuando el valor del parámetro < estándar = 1, valor del parámetro > estándar = 0.	Dictamen del panel de expertos, y la suma del valor de todos los pesos es igual a 1	Utiliza dos funciones matemáticas La primero es aditiva: $WQI = \sum_{i=1}^{n} s_i w_i$ La segundo es multiplicativa: $WQI = \prod_{i=1}^{n} s_i^{w_i}$	Cinco categorías - excelente (90–100) - Buena (70–89) - Regular (50–69) - Malo (25–49) - Muy malo (0–24)
Índice SRDD (1970)	• 10 parámetros • Método Delphi	• Valor de los parámetros directamente utilizado como subíndice. • Rangos de escala de subíndices de 0 a 100.	Dictamen del panel de expertos, y la suma del valor de todos los pesos es igual a 1	Adopta la función matemática aditiva $SRDD - WQI = \frac{1}{100}\left(\sum_{i=1}^{n} S_i W_i\right)^2$ Emplea la fórmula multiplicativa $WQI = \prod_{i=1}^{n} s_i^{w_i}$	Clasificación - Limpia (90–100) - Bueno (80–89) - Bueno con tratamiento (70–79) - Tolerable (40–69) - Contaminado (30–39) - Severamente contaminado (20–29) - Residual (0–19)
Índice de Dinius (1972) *Versión modificada del índice NSF	• 11 parámetros • Método Delphi	Valor de los parámetros directamente asignado como subíndice.	Peso desigual utilizado la suma del valor de ponderación que es igual a 10	Emplea la fórmula multiplicativa $WQI = \prod_{i=1}^{n} s_i^{w_i}$	Clasificación: - Purificación no requerida (90–100) - Purificación menor Requerida (80–90) - Tratamiento requerido (50–80) - Doutful (40–50)
Índice de Ross (1977)	• 4 parámetros • Método Delphi	• Dictamen del panel de expertos. • Sistema de subíndices.	Dictamen del panel de expertos, y la suma del valor de todos los pesos es igual a 1	Usa la función matemática aditiva $WQI = \left[\frac{w_1 s_1 + w_2 s_2 + w_3 s_3 + \cdots + w_n s_n}{w + w_2 + w_3 \cdots\cdots + w_n}\right] m_1 m_2$	No especificado
Índice Bascaron (1979)	• 26 parámetros	• Valor de los parámetros directamente transformado en valor de	Peso desigual y fijo. Técnica de ponderación.	Utiliza dos funciones aditivas • La función subjetiva	Cinco categorías - Excelente (90-100) - Bueno (70–90) - Medio (50–70) - Malo (25–50)

Modelos	Componentes del modelo				
	Nº de parámetros y proceso de selección	Procedimiento de sub-indexación	Ponderación de parámetros	Técnicas de agregación	Escala de calificación
		subíndice usando liner. • Función de transformación. • Varía de 0 a 100	Rangos de 1 a 4. Suma de pesos.	$Bascaron - WQI_{obj} = \frac{\sum w_i s_i}{\sum w_i}$ • Función WQI objetivo $WQI_{sub} = k\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i s_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}$	- Muy malo (0–25)
Índice de Oregón (1980) *Versión modificada del índice NSF	• 8 parámetros • Método Delphi	• Se estimaron los subíndices. • Uso del promedio funciones matemáticas. Logarítmico. • Se utilizó la transformación y la regresión no lineal para generar subíndices	Valores de subíndice utilizados directamente como factores de ponderación	Usa la función matemática aditiva $WQI = \left[\frac{w_1 + w_2 + w_3 \cdots + w_n}{w_1 q_1 + w_2 q_2 + w_3 q_3 + \cdots + w_n q_n}\right] m_1 m_2$ • Dojlido et al. (1994), recomienda la media cuadrática armónica modificada no ponderada $WQI = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{s_i^2}}}$	Cinco categorías - Excelente (90–100) - Buena (85–89) - Regular (80–84) - Pobre (60–79) - Muy pobre (<60)
Índice EQ (1982)	• 9 parámetros • Método Delphi	• Utilizada un sistema fijo y guía de calidad de agua nacional-internacional. • Dictamen del panel de expertos.	Peso fijo y desigual (0.1 para parámetros físicos, químicos y biológicos, y 0.15 para parámetros orgánicos e inorgánicos)	Usa la función matemática aditiva $WQI = \left[\frac{w_1 s_1 + w_2 s_2 + w_3 s_3 + \cdots + w_n s_n}{w + w_2 + w_3 \cdots\cdots + w_n}\right] m_1 m_2$	Cinco categorías - Excelente (90–100) - Muy buena (80–89) - Buena (70–79) - Regular (55–69) - Pobre (<55)
Índice de House (1986) *versión adaptada del índice SRDD	• 9 parámetros • Entrevista al personal clave • Dictamen del panel de expertos	• Valor de los parámetros utilizados directamente como subíndice. • Rangos de escala de subíndices de 10 a 100.	El dictamen del panel de expertos, y la suma del valor de los pesos es igual a 1	Incluye el Método SRDD $SRDD - WQI = \frac{1}{100}\left(\sum_{i=1}^{n} S_i W_i\right)^2$	Cuatro categorías - Alta calidad (71–100) - Calidad razonable (51–70) - Calidad moderada (31–50) - Contaminado (10–30)
Índice Smith (1990)	• 7 parámetros • Método Delphi	Sistema fijo y basado en dictamen del panel de expertos.	No requerido	• Utiliza la función de operador mínima $WQI = Min(s_i, s_{i+1}, s_{i+2} \cdots\cdots I_{sub_n})$ Utiliza la función de la raíz cuadrada de la función media armónica $WQI = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{s_i^2}}}$	No especificado
Índice Dojildo (1994)	• 26 parámetros • sistema abierto y cerrado (grupo básico	No requerido	No requerido	Raíz cuadrada adoptada de la función de la media armónica $WQI = \sqrt{\frac{n}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{s_i^2}}}$	Cuatro categorías - Muy limpio (75 – 100) - Limpio (50–75)

Modelos	Componentes del modelo				
	Nº de parámetros y proceso de selección	Procedimiento de sub-indexación	Ponderación de parámetros	Técnicas de agregación	Escala de calificación
	de parámetros)				- Contaminado (25–50) - Muy contaminado (0–25)
Índice Columbia Británica (1995)	• Usa parámetros de monitoreo de uso común • Sistema de elección abierta • Al menos usa 10 parámetros	Subíndices basado sen dictamen del panel de expertos.	Formulación desigual y basado en expertos	Fórmula matemática especifica	Cuatro categorías - Excelente (0–3) - Bueno (4–17) - Regular (18–43) - Marginal (44–5
Índice Dalmatian (1999) Versión modificada	• 8 parámetros • Método Delphi	Valor de los parámetros utilizados directamente como subíndice.	Peso fijo y desigual Corregido por el dictamen del panel de expertos, y la suma del valor de los pesos es igual a 1	El índice utiliza fórmulas automatizadas	Categorías no especificadas
CCME (2001) *Modificado del índice BCWQI	• 4 parámetros • Método Delphi	No requerido	No requerido	Usa funciones matemáticas $WQI = 100 - \left[\frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732}\right]$ $F_1 = \left[\frac{number\ of\ failed\ parameters}{total\ number\ of\ parameters}\right] \times 100$ $F_2 = \left[\frac{number\ of\ failed\ tests}{total\ number\ of\ tests}\right] \times 100$ $excursion_i = \left[\frac{failed\ test\ value_i}{Objective_j}\right] - 1$ $excursion_i = \left[\frac{Objective_j}{failed\ test\ value_i}\right] - 1$ $nse = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n} excursion_j}{total\ number\ of\ test}\right] - 1$	Cinco categorías - Excelente (95 – 100) - Bueno (80 – 94) - Regular (65 – 79) - Marginal (45 – 65) - Pobre (0 – 44)
Índice Liou (2004)	• 13 parámetros • Los parámetros se seleccionan basados conforme su importancia con el medio ambiente y la salud	Parámetros reales concentración directa utilizada como subíndice.	Sistema de ponderación equitativa. Los factores de ponderación fueron generado por la clasificación de uso. Se usan curvas que fueron ilustradas. Basado en el estándar .	El modelo propone funciones hibridas aditivas y multiplicativas $WQI = \left[\frac{w_1 s_1 + w_2 s_2 + w_3 s_3 + \cdots + w_n s_n}{w + w_2 + w_3 \cdots\cdots + w_n}\right] m_1 m_2$ $BrownWQI = \sum_{i=1}^{n} w_i s_i$	No especificado
Said índice (2004)	• 5 parámetros • Basado en la importancia	Valor de parámetros	No es necesario	Función matemática	Tres categorías. - Máxima pureza (3)

Modelos	Componentes del modelo				
	Nº de parámetros y proceso de selección	Procedimiento de sub-indexación	Ponderación de parámetros	Técnicas de agregación	Escala de calificación
	del medio ambiente	utilizado como subíndices.		$WQI = log\left[\frac{(DO)^{1.5}}{(3.8)^{TP}(Turbi)^{0.15}(15)^{fecal/10000} + 0.14(SC)^{0.5}}\right]$	- Calidad marginal (<2) - Mala calidad (<1)
Índice de Malasia (2007)	• 6 parámetros	• Valor de los parámetros utilizados directamente como subíndice. • Rangos de escala de subíndices entre 0 y 100.	Sistema desigual y cerrado. Corregido por el dictamen del panel de expertos, y la suma del valor de los pesos es igual a 1	Utiliza una simple función aditiva	Utiliza una escala de calificación individual basada en parámetros
Índice Hanh (2010)	• 8 parámetros • Basado en la disponibilidad de los datos de monitoreo	• Sistema de indexación basado en curvas de calificación • Curvas desarrollada en base a agua superficial • Estándares de calidad de Vietnam	No es necesario	Dos funciones, una general y una básica $WQI = \prod_{i=1}^{n} s_i^{w_i}$ $WQI = \sum_{i=1}^{n} s_i w_i$	Cinco categorías - Excelente (91–100) - Bueno (76–90) - Regular (51–75) - Contaminada (26–50) - Muy contaminada (<25)
Índice Almeida (2012)	• 10 parámetros • Método Delphi	• Sistema de indexación basado en curvas de calificación •Curvas de clasificación de parámetros recomendadas por un panel de expertos	Sistema cerrado y desigual Factores de ponderación fijados por panel de expertos La suma del valor de los pesos es 1	Emplea la fórmula multiplicativa $WQI = \prod_{i=1}^{n} s_i^{w_i}$	Cuatro categorías - Excelente (91–100) - Bueno (81–90) - Medio (71–80) - Pobre (<25) - Pobre (<70)
Índice de Java Occidental (2017)	• 13 parámetros • Basado en la disponibilidad de los datsl de monitoreo y comparación de estándares.	• Usa la función matemática directamente • Adoptado un criterio para generar subindexación	Utiliza herramientas de toma de decisiones múltiples como jerarquía analítica Peso fijo y desigual Corregido por el dictamen del panel de expertos, y la suma del valor de los pesos es igual a 1	Emplea la fórmula multiplicativa $WQI = \prod_{i=1}^{n} s_i^{w_i}$	Cinco categorías -Excelente (90–100) -Buena (90–75) -Regular (75–50) -Contaminada (50–25) -Muy Contaminada (25-5)

Fuente: tomado y modificado de Uddin *et al*. (2021).

4. Evolución de los índices de calidad del agua en México

En México el índice INDIC-SEDUE fue el primero en aplicarse en el país, específicamente en Jalisco; está fundamentado en el desarrollado por Dinius (1972) que a su vez es una modificación del índice de NSF, adaptado y modificado por la Dirección General de Protección y Ordenación Ecológica (DGPOE) de la SEDUE (Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología) (Montoya *et al*., 1997).

Ante la necesidad de encontrar un método simple, uniforme y consistente y que permita resumir la calidad del agua en una expresión simple a la población, se desarrolló un índice para el que se requirió la medición de parámetros fisicoquímicos y microbiológicos que evaluarán la contaminación del agua; considerando el uso del agua en una escala normalizada de medición para expresar la relación a la existencia de diferentes contaminantes en el agua y el grado de impacto en sus diferentes usos; lo cual se denominó índice de calidad del agua (ICA) (CONAGUA, 2019). Este índice fue creado para evaluar el grado de contaminación de los diferentes cuerpos de agua para una determinada fecha de un muestreo o muestreos, expresada como porcentaje en función de su calidad. De tal manera que el agua contaminada tendría un ICA cercano o igual a 0% y de 100% en excelentes condiciones (CONAGUA, 2019).

Este ICA se fundamente en un cálculo basado en la asignación ponderada en los parámetros analizados. En este índice incluye 18 parámetros (i) con distintos pesos relativos (Wi), según la importancia considerada para cada uno de ellos en la evaluación total (Cuadro 2) y se estima de acuerdo con la siguiente fórmula (CONAGUA, 2019):

$$ICA = \sum_{i=1}^{N} I_i W_i \quad / \sum_{i=1}^{N} W_i \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde:
ICA= índice de calidad del agua
Ii= calidad para el parámetro i
Wi= Coeficiente de ponderación para cada parámetro i
n= Número total de parámetros

Durante los últimos 30 años, el crecimiento de los centros poblacionales, el desarrollo económico y la industrialización, han impactado los cuerpos de agua con sus desechos y descargas de aguas residuales; éstos se vierten en los cuerpos de agua con altas cargas de elementos potencialmente tóxicos (EPT) que no están considerados, por lo que la evaluación con este índice se consideró incompleta y subjetiva. Por lo tanto, en los últimos años, ICA ha sido sustituido por solo algunos parámetros como indicadores que muestran la influencia humana (presencia de centros urbanos e industriales) a través de

parámetros con características de calidad diferenciable. Entre esos parámetros se encuentra la Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5), la Demanda Química de Oxígeno (DQO) y los Sólidos Suspendidos Totales (SST) (Cuadro 3). Estos parámetros permiten identificar gradientes que varían desde una condición relativamente natural, sin influencia de la actividad humana hasta agua que muestra indicios de aportaciones importantes de descargas de aguas residuales municipales y no municipales, así como áreas con deforestación severa (CONAGUA, 2019).

Cuadro 2. Valores de los pesos ponderados considerados en los 18 parámetros del ICA en México

Parámetro	Peso (W i)	Parámetro	Peso (W i)
Demanda Bioquímica de Oxígeno	5.0	Nitrógeno en nitratos	2.0
Oxígeno disuelto	5.0	Alcalinidad	1.0
Coliformes fecales	4.0	Color	1.0
Coliformes totales	3.0	Dureza total	1.0
Sustancias activas al azul de metileno (Detergentes)	3.0	Potencial de Hidrógeno (pH)	1.0
Conductividad eléctrica	2.0	Sólidos suspendidos	1.0
Fosfatos totales	2.0	Cloruros	0.5
Grasas y aceites	2.0	Sólidos disueltos	0.5
Nitrógeno amoniacal	2.0	Turbiedad	0.5

Fuente: CONAGUA, 2019.

Cuadro 3. Indicadores de calidad utilizados por CONAGUA, 2019

Parámetro	Descripción	Criterio/clasificación (mg/L)
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO_5)	Se utiliza para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua proveniente principalmente de las descargas de aguas residuales de origen municipal y no municipal.	$DBO_5 \leq 3$ Excelente calidad no contaminada. $3 < DBO_5 \leq 6$ Buena calidad $6 < DBO_5 \leq 30$ Aceptable $30 < DBO_5 \leq 120$ Contaminada $DBO_5 > 120$ Fuertemente contaminada
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	Se utiliza para determinar la cantidad de materia orgánica presente en los cuerpos de agua proveniente principalmente de las descargas de aguas residuales, de origen municipal y no municipal e indica sobre todo la presencia de sustancias provenientes de descargas no municipales.	$DQO \leq 10$ Excelente calidad no contaminada. $3 < DQO \leq 20$ Buena calidad $6 < DQO \leq 40$ Aceptable $40 < DQO \leq 200$ Contaminada $DQO > 200$ Fuertemente contaminada
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	Los SST tienen su origen en las aguas residuales y erosión del suelo. El incremento de los niveles de SST hace que un cuerpo de agua pierda la capacidad de soportar la diversidad de la vida acuática.	$SST \leq 25$ Excelente calidad no contaminada. $25 < SST \leq 75$ Buena calidad $75 < SST \leq 150$ Aceptable $150 < SST \leq 400$ Contaminada $SST > 400$ Fuertemente contaminada

Fuente: Gerencia de Calidad del Agua (CONAGUA, 2019).

5. Ventajas y desventajas de la aplicación de índices de calidad del agua

Los índices de calidad son herramientas que asignan un valor de calidad al medio a partir del análisis de diferentes parámetros. Su combinación da una visión precisa del estado ecológico y el estado del medio biológico. Entre las ventajas más sobresalientes se pueden enlistar las siguientes:

- Resumen y simplifican los datos.
- Generalmente son expresiones numéricas, que pueden incluirse en modelos para la toma de decisiones.
- Son simples y entendibles a todo público (políticos, tomadores de decisiones, usuarios)
- Permiten mostrar la variación espacial y temporal de la calidad del agua.
- Pueden identificar tendencias y áreas problemáticas.
- Ayudan a definir prioridades en la gestión del agua.

Dentro de sus limitaciones se pueden mencionar las siguientes:

- Deben ser tomados con precaución, en forma crítica y actualizados periódicamente.
- Pueden ser subjetivos y sesgados en su formulación.
- No pueden evaluar todos los riesgos presentes en el agua al mostrar solo un número.

  No son de aplicación universal.

6. Aplicabilidad de los índices para México

Los índices de calidad son considerados como una opción factible para la interpretación de parámetros físicos, químicos y biológicos de un programa de evaluación de la calidad del agua ya que la combinación de diferentes parámetros permite la obtención de un valor que puede ser interpretado fácilmente, tanto por tomadores de decisiones, técnicos en la materia como por la comunidad en general; facilitando la toma de acciones de prevención y solución.

Como primera consideración, antes de la aplicación de cualquier índice internacional, es necesario conocer las bases metodológicas de cada índice, debido a que han sido formulados para resolver problemas específicos de una determinada región, o bien la importancia (ponderación) de los parámetros a evaluar basada en condiciones específicas, por lo que no siempre son aplicables en todos los sitios. Por lo tanto, siempre se debe llevar a cabo un análisis

crítico de los índices a utilizar en algún cuerpo de agua del país, tanto superficial como subterráneo.

Por otro lado, CONAGUA es el ente regulador y administrador de los recursos hídricos en el país, emplea como indicadores de calidad los parámetros DBO5, DQO, y SST. Al medirse individualmente, existe una gran limitación, ya que solo reflejan cierto tipo de contaminación, por ejemplo la DQO y la DBO5 son consideradas para evaluar la contaminación de origen orgánico e inorgánico, mientras que los Sólidos Suspendidos Totales, reflejan la cantidad de residuos generados por las aguas residuales o la erosión del suelo.

La propuesta canadiense del CCME-WQI; es el índice que tiene gran aplicabilidad en cualquier caso de estudio, ya que basa el logro de los objetivos de calidad como criterios válidos, y que consiste absolutamente en la comparación de los valores obtenidos de ciertos parámetros, con los valores límites que se establecen en la legislación existente tal es el caso de México, la norma NOM-127-SSA1- 2021 (DOF, 2022) para uso y consumo humano, o los lineamientos de calidad del agua de la *Ley Federal de Derechos* (2021), los Criterios Ecológicos de calidad del agua (SEDUE, 1989) en sus disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes. De manera extraoficial, dependencias como CONAGUA e IMTA (Insituto Mexicano de Tecnología del Agua) utilizan este índice para evaluaciones de calidad debido a sus grandes ventajas y su amplia perspectiva.

Una de sus mayores ventajas es la flexibilidad a la hora de seleccionar los criterios normativos, ya que se puede aplicar para evaluar la calidad en función del uso del agua como fuente de abastecimiento humano, para protección a la vida acuática como descargas de aguas residuales; todo ello con base en el número de parámetros necesarios a considerar para cada uso. Este índice también permite incorporar diferentes períodos de tiempo, ofreciendo una perspectiva completa en cada caso de estudio. El CCME-WQI es uno de los índices que pueden adecuarse con mayor facilidad a los requerimientos de la legislación en un determinado país, ya que no jerarquiza ni pondera los parámetros pues tienen igual importancia.

7. Caso de estudio: Evaluación de la calidad del agua de manantial aplicando el CCME WQI en la región minera de Taxco

7.1 Aplicación del CCME-WQI para determinar la calidad del agua

El modelo CCME-WQI se desarrolló a partir del modelo BCWQI en 2001 (Lumb *et al*., 2011). A nivel mundial, el modelo CCME WQI se ha aplicado a una amplia gama de evaluaciones de calidad del agua superficial y subterránea (Abbasi y Abbasi, 2012; Salcedo *et al*., 2016; Uddin *et al*., 2017; Basha *et al*., 2022). Es ampliamente utilizado por su facilidad y adaptabilidad, ya que

brinda flexibilidad en la elección de los parámetros que se incluye en la evaluación de la calidad.

Conceptualmente, CCME WQI comprende tres factores (Figura 3):

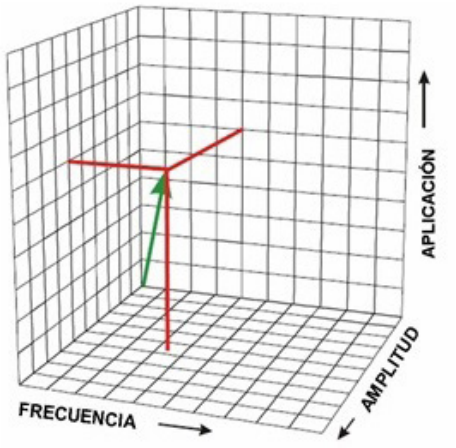
- El factor 1 (F1): evalúa el alcance del incumplimiento de los criterios ó límites de calidad (objetivo) del agua durante el período de interés, siendo las variables los parámetros a evaluar.

$$F_1 = \left(\frac{Número\ de\ variables\ que\ no\ cumplen\ el\ objetivo}{Número\ total\ de\ variables}\right) * 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

- El factor 2 (F2): se ocupa de la frecuencia, es decir, cuántas veces el valor analizado estuvo fuera de los límites de calidad del agua (objetivo), siendo las pruebas, las muestras de agua a evaluar.

$$F_2 = \left(\frac{Número\ de\ pruebas\ que\ no\ cumplen\ el\ objetivo}{Número\ total\ de\ pruebas}\right) * 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

Figure 3. Representación del CCME-WQI



Fuente: tomado de CCME (2001).

- El factor 3 (F3): considera la amplitud de la desviación o la cantidad en la que no se cumplen los criterios ó límites de calidad del agua (objetivo); bien en el caso de que el valor de la prueba (muestra) no debe exceder el valor del criterio o límite.

$$Desviación\ anómala_i = \left(\frac{Número\ de\ pruebas\ que\ no\ cumplen\ el\ objetivo}{Objetivo_j}\right) - 1 \quad \text{Ecuación 4}$$

O en el caso de que el valor de la prueba excede por debajo el valor mínimo del objetivo:

$$Desviación\ anómala_i = \left(\frac{Objetivo_j}{Número\ de\ pruebas\ que\ no\ cumplen\ el\ objetivo}\right) - 1 \quad \text{Ecuación 5}$$

Para calcular F3: es necesario calcular nse o función asintótica de escalas normalizadas a través de la suma de la desviación anómala de límites, como se expone en la siguiente fórmula:

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^{n} desviación\ anómala}{número\ de\ muestras} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$F_3 = \frac{nse}{0.01\ nse + 0.01} \quad \text{Ecuación 7}$$

El valor del índice se calcula usando la siguiente fórmula:

$$CCME - WQI = 100 - \frac{\sqrt{F_1^2 + F_2^2 + F_3^2}}{1.732} \quad \text{Ecuación 8}$$

El divisor 1.732 normaliza los valores resultantes a un rango entre 0 y 100 donde 0 representa la "peor" calidad del agua y 100 representa la "mejor" calidad del agua. El modelo CCME identifica cuatro categorías o clases de calidad del agua:

- Excelente (Valor 95-100): agua de buena calidad. En estas condiciones el agua está libre de agentes patógenos muy cerca de las condiciones físicas o rangos de agua pura. Este índice solamente puede ser obtenido si todas las mediciones están dentro de objetivos en todas las ocasiones.

- Buena (Valor 80-94): agua de buena calidad, por lo cual, sólo su uso requiere un mínimo de tratamiento. Su condición representa condiciones naturales y/o niveles de calidad del agua deseables.
- Regular (Valor 65-79): representa calidad regular de tratamiento para su uso.
- Contaminada (Valor 45-64): agua contaminada. En esta condición, el agua presenta riesgos para su uso. Las condiciones de tratamiento se encuentrna fuera de los criterios deseables de calidad del agua.
- Muy Contaminada (Valor 0-44): agua de muy baja calidad. Su uso requiere tratamiento y se encuentra fuera de los criterios deseables de calidad del agua.

El CCME cuenta con un software en *Visual Basic* desarrollado dentro de Microsoft Excel para calcular los puntajes del índice de calidad. La hoja de cálculo es bastante flexible ya que puede tomar una gran cantidad de datos en conjunto con gran cantidad de variables de calidad del agua (parámetros) para calcular el índice. La salida de los cálculos está disponible en forma de un cuadro que muestra los valores de F1, F2, F3, puntuación del índice, número de variables analizadas número de muestras, número total de variables, pruebas totales, pruebas fallidas, pruebas aprobadas y pruebas pendientes (bajo nivel de detección). También se obtiene un histograma de frecuencia de F1, F2 y F3.

Una de las ventajas de la aplicación del índice CCME es su flexibilidad, ya que permite evaluarse con base en diferentes normatividades (u objetivos de calidad), así como para diferentes usos, y se puede evaluar tanto un grupo reducido de parámetros con un gran número de éstos, dependiendo de la información disponible. Antes de calcular el índice se debe definir el cuerpo de agua en evaluación, los objetivos apropiados (o límites) para la evaluación y el período de tiempo; puede realizarse por estación del año o durante la temporada de secas o lluvias puntos de muestreo en un año o varios (sitios a lo largo de un río, pozos de un acuífero, etc.) así como estaciones individuales (CCME, 2001).

El período de tiempo que se elige depende de la información disponible y del tipo de evaluación del usuario. Se utiliza a menudo un período mínimo de un año porque los datos suelen ser recolectados para reflejar este período (mensual o trimestral). Los datos de diferentes años pueden combinarse especialmente cuando algunos años basan sus datos incompletos pierden su variabilidad.

Así, para el cálculo se requiere al menos cuatro variables (parámetros) como mínimo recomendado; sin embargo, no existe un número máximo de variables o muestras. Obtener datos significativos debe tener cuidado con la formulación y combinación de los parámetros o variables (CCME, 2001). Evi-

dentemente, la elección de un pequeño número de variables para las cuales los objetivos no se cumplen, ofrece una perspectiva diferente que se utiliza en un número grande de variables y sólo algunos de los objetivos no se cumplen. Los usuarios deben emplear profesionalmente su juicio para determinar cuáles y cuántas variables deben incluirse en un óptimo resultado (CCME, 2001).

7.2 Descripción de la zona de estudio

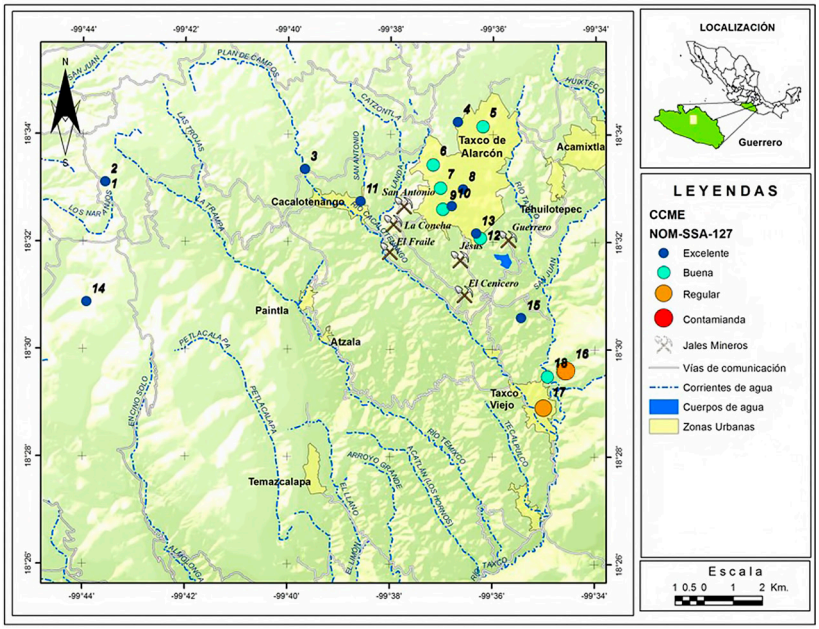
La zona de estudio se ubica dentro del acuífero Buenavista-Iguala (Figura 4), cuenca del Medio Balsas (INEGI, 2020), comprende los municipios de Taxco e Iguala, al norte del estado de Guerrero dentro del distrito minero de Taxco (México); ahí, el clima es cálido subhúmedo con temperatura media anual de 22 °C, abril es el el mes más cálido, con una temperatura promedio de 24 °C y el mes más frío diciembre (promedio de 20 °C). La precipitación del orden de 1000 mm/año, la lluvia se concentra en el período de junio a octubre con valores máximos de 254 mm en septiembre y, el mes más seco, febrero con 7.6 mm (Dótor *et al*., 2014). El clima del municipio de Iguala es cálido subhúmedo, la temperatura media anual de 26 °C con una máxima de 38 °C y una mínima de 14 °C; los meses más cálidos son abril y mayo, los fríos diciembre y enero. La precipitación es moderada de junio a septiembre con una precipitación media anual de 1100 mm/año, valores máximos de 226 mm en julio, siendo marzo el mes más seco con 4.2 mm de precipitación (INEGI, 2020).

En la región, la minería produjo grandes cantidades de desechos mineros líquidos y sólidos que contenían elementos potencialmente tóxicos (EPT) como As, Cd, Pb, Ba, Zn, Fe, etc. (Talavera et al., 2016; Dótor *et al*., 2017). Los residuos sólidos históricos fueron enterrados o reelaborados durante el siglo XX, pero los residuos modernos (1940 a la actualidad) se acumulan en los depósitos de jales (Antonio, El Fraile, La Concha, El Solar, Guerrero I, Guerrero II y Los Jales, etc.; Figura 4) que contienen material moderadamente a altamente oxidado, sulfuros y EPT como Pb, Ba, Cd, Zn, Fe, As y Sr. Estos jales fueron depositados sobre rocas de Formación Mexcala y Esquistos Taxco (Arcega *et al*., 2009; Talavera *et al*., 2016); estas formaciones se consideran unidades esencialmente impermeables, aunque la porosidad secundaria puede ser localmente importante. Estas características evitan la infiltración de grandes volúmenes de drenaje ácido de mina (AMD) a los acuíferos, pero permitiendo un drenaje superficial de lixiviados ricos en metales, lo que afecta la calidad del agua efluente (Dótor *et al*., 2014; 2017).

El distrito minero de Taxco ha sido reconocido como una región de explotación y procesamiento de metales preciosos desde la época prehispánica hasta el cierre de las actividades mineras en 2009; actualmente un famoso destino turístico y productor internacional de artesanías y joyas en metales preciosos (Clausell, 2010). El procesamiento de metales ha traído impactos negativos sobre los recursos naturales, siendo los ríos los más afectados por

el vertido de las aguas residuales procedentes de estas actividades (Talavera *et al*., 2016), por lo que la principal fuente de abastecimiento es el acuífero Buenavista-Iguala, en concreto, el aprovechamiento de los manantiales (Talavera *et al*., 2016).

Figura 4. Localización del distrito minero de Taxco y manantiales muestreados



Fuente: elaboración propia.

8. Metodología

La evaluación de la calidad del agua se realizó utilizando el CCME WQI con los límites de la NOM-SSA-127-2021 (DOF, 2022) para uso y consumo humano, ya que esta agua procedente de los manantiales utiliza como fuente de abastecimiento para el desarrollo de actividades domésticas. En la evaluación se consideraron 11 parámetros que están incluidos en la norma, los cuales representan los objetivos o criterios de calidad utilizados para evaluar el índice (Cuadro 4).

Cuadro 4. Objetivos utilizados para la evaluación del índice de calidad del agua para uso y consumo humano

No.	Objetivo (parámetro a evaluar)	Unidades	Valor límite NOM-SSA-127-2021
1	Dureza total	mg/L	500
2	SDT	mg/L	1000
3	pH	Unidades de pH	6.5 – 8.5
4	Nitratos	mg/L	11
5	Sulfatos	mg/L	400
6	Fluoruros	mg/L	1.5
7	Bario	mg/L	1.3
8	Hierro	mg/L	0.3
9	Manganeso	mg/L	0.15
10	Plomo	mg/L	0.01
11	Cobre	mg/L	2

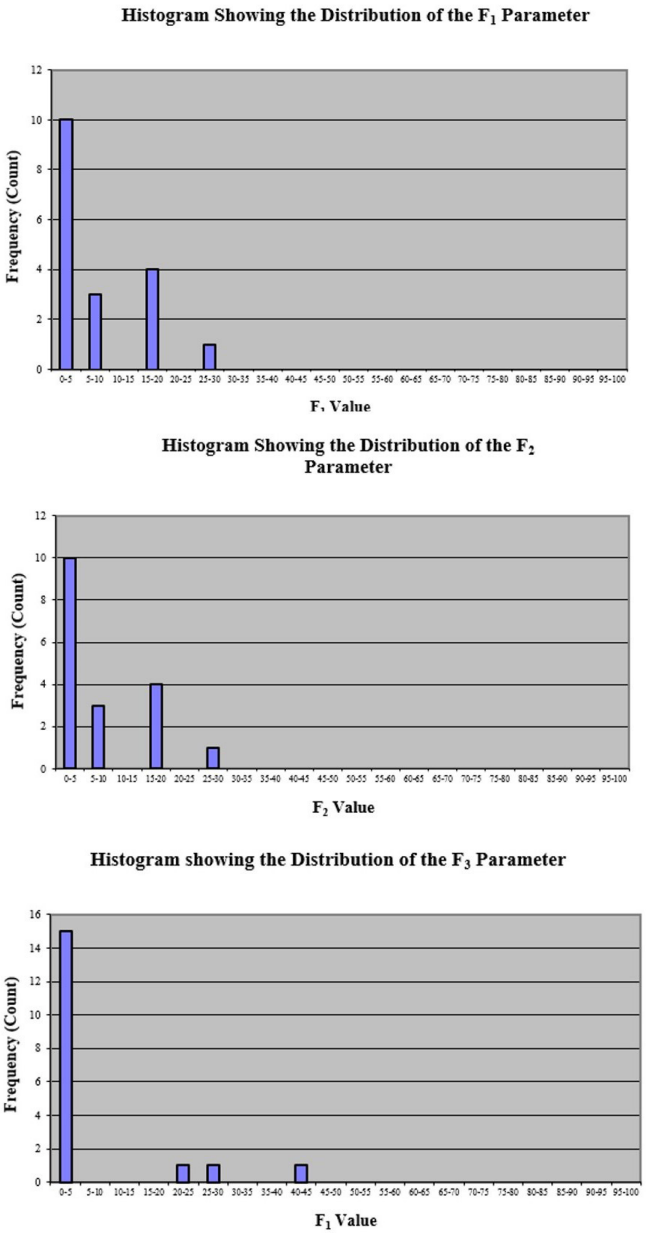
Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Los valores reportados por el índice CCME WQI indican que 8 de las muestras de agua de los manantiales no cumplen con los límites evaluados para consumo humano, lo cual se refleja a través de F1, F2 y F3 (Cuadro 5 y Figura 5). En la figura 5 se resume el comportamiento de F1, F2 y F3 a través de un histograma de frecuencias; en esta figura se muestra el porcentaje de variables que no cumplen con los objetivos de calidad respecto al número total de variables a través F1 y el porcentaje de pruebas individuales que no cumplen con los objetivos de calidad F2 por lo que los valores de F1 y F2 se concentran en un porcentaje de incumplimiento del 18.2 % en 4 sitios y 2 variables fallidas, 9 % en 3 sitios y una variable fallida con un sitio del 27% y 3 variables fallidas, mientras que el resto de los sitios, en este caso 10, cumplen los criterios en todas las variables (11).

Con base en estos datos y una vez tomado el valor del CCME-WQI, 18 manantiales analizados, 10 se encuentran en excelente calidad, 6 en calidad buena y 2 de calidad regular (Cuadro 5 y Figura 6). La calidad del agua en los manantiales se ha visto disminuida porque algunos casos rebasaron el límite permisible de dureza total y nitratos (500 mg/L y 11 mg/L, respectivamente); se detectó la presencia de EPT por debajo de los límites máximos permisibles (Fe, As, Ba, Mn y Pb), pero a largo plazo podría convertirse en un problema de salud en los pobladores, debido que el agua no recibe ningún tipo de tratamiento para metales.

Figura 5. Histogramas de frecuencias que muestra la distribución porcentual de los valores F1, F2 y F3



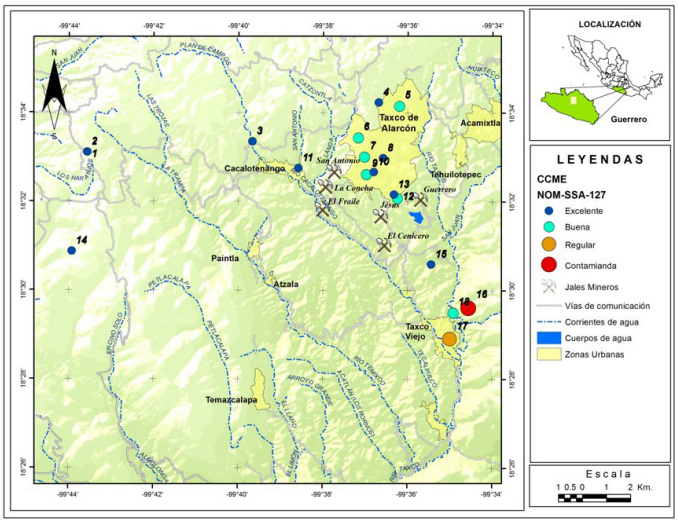
Fuente: elaboración propia.

Cuadro 5. Resultados de la evaluación del índice de calidad del agua procedentes de los manantiales (CME-WQI)

Manantial	F1	F2	F3	CCME-WQI	Calidad
1 Horconcito 1	0.0	0.0	0.0	100.0	Excelente
2 Horconcito 2	0.0	0.0	0.0	100.0	Excelente
3 Cascada	0.0	0.0	0.0	100.0	Excelente
4 Chacoalco	0.0	0.0	0.0	100.0	Excelente
5 Mulata	*18.2*	18.2	4.4	84.9	Buena
6 Landa	*9.1*	9.1	1.8	92.5	Buena
7 Pozitos	*18.2*	18.2	22.8	80.2	Buena
8 Pedro Martin	0.0	0.0	0.0	100.0	Excelente
9 Arroyo 1	*9.1*	9.1	2.5	92.4	Buena
10 Arroyo 2	0.0	0.0	0.0	100.0	Excelente
11 Cacalotenango	0.0	0.0	0.0	100.0	Excelente
12 Ejido de Arroyo 1	*9.1*	9.1	0.8	92.6	Buena
13 Ejido de Arroyo 2	0.0	0.0	0.0	100.0	Excelente
14 Atzala	0.0	0.0	0.0	100.0	Excelente
15 Hueymatla	0.0	0.0	0.0	100.0	Excelente
16 Huamuchilito	*18.2*	18.2	41.0	72.0	Regular
17 Taxco el viejo 1	*27.3*	27.3	25.0	73.5	Regular
18 Taxco el Viejo 2	*18.2*	18.2	2.1	85.1	Buena

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Distribución espacial de la evaluación del índice de calidad



Fuente: elaboración propia.

Bibliografía

Abbasi, T., Abbasi, S.A. (2012). Water-Quality Indices. Chapter 16 - Water-Quality Indices: Looking Back, Looking Ahead. *Elsevier*, pp. 353–356. https://doi.org/10.1016/B978-0-444-54304-2.00016-6

Árcega–Cabrera, F., Armienta, M.A., Daesslé, L.W., Castillo-Blum, S.E., Talavera, O., Dótor, A. (2009). Variations of Pb in a mine-impacted tropical river, Taxco, Mexico: Use of geochemical, isotopic and statistical tools. *Appl. Geochem., 24*, 162–171. https://doi:10.1016/j.apgeochem.2008.09.015

Basha, U.I., Rajasekhar, M., Ghosh, S. (2022). Spatial assessment of groundwater quality using CCME-WQI and hydrochemical indices: a case study from Talupula Mandal, Ananthapuramu district, South India. *Appl. Water Sci., 12*, 168. https://doi.org/10.1007/s13201-022-01677-5

Bilgin, A. (2018). Evaluation of surface water quality by using Canadian Council of Ministers of the Environment Water Quality Index (CCME WQI) method and discriminant analysis method: a case study Coruh River Basin. *Environ. Monit. Assess.* 190, 554 https://doi.org/10.1007/s10661-018-6927-5

Boyacioglu, H. (2007). Development of a water quality index based on a European classification scheme. *Water SA, 33*(1), https://doi.org/101-106 10.4314/wsa.v33i1.47882

Clausell, A.M. (2010). *Historia de la Plata Mexicana. Academia, Ciencia y Cultura. Enero-marzo 2010; Volumen II,* (1), 24–34. https://medigraphic.com/pdfs/aapaunam/pa-2010/pa101f.pdf

CONAGUA (2019). *Gerencia de Calidad del Agua*, junio, 2019

Cude, C. (2001). Oregon Water Quality Index: A Tool for Evaluating Water Quality Management Effectiveness., Paper No. 99051, *J. Am. Res. Ass*., 37, 1: 125 - 138.

Dótor, A.A., Armienta, M.A., Arcega, F., Talavera, M.O. (2014). Procesos de transporte de arsénico y metales en aguas superficiales del distrito minero de Taxco, México. Aplicación de isótopos estables. *Hidrobiológica* 24, 256.

Dótor, A., Armienta, H.M., Talavera, M.O., y Ruiz, J. (2017). Geochemical behavior of Cu and sulfur isotopes in the tropical mining region of Taxco, Guerrero (southern Mexico). *Chem. Geol.*, 471, 1–12, https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2017.09.005.

DOF (2022). NORMA Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-2021. *Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de la calidad del agua.* Diario Oficial de la Federación el 2 de mayo de 2022.

Fernández, N., Solano, F. (2005). *Índices de Calidad y de contaminación del Agua.* Universidad de Pamplona. Colombia

Hallock, D. (2002). *A water quality index for ecology's stream monitoring program*. Washington State Department of Ecology.

Horton, R. K. (1965) An index number system for rating water quality. *J. Water Pollut. Control Fed. 37*(3):300–306.

INEGI (2020). Censo de Población y Vivienda (2020). *Panorama sociodemográfico de Guerrero Censo de Población y Vivienda. 2020*. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825197858.pdf

Ley Federal de Derechos (2021) *Disposiciones aplicables en materia de aguas nacionales y sus bienes públicos inherentes*. Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) Gobierno de México. https://www.gob.mx/conagua/documentos/ley-federal-de-derechos-2021

Liou, S.M., Lo, S.L., Wang, S.H. (2004). A Generalized Water Quality Index for Taiwan. Environ *Monit. Assess.* 96, 35–52 (2004). https://doi.org/10.1023/B:EMAS.0000031715.83752.a1.

Lumb, A., Sharma, T. C., Bibeault, J.-F., Klawunn, P. (2011). A Comparative Study of USA and Canadian Water Quality Index Models. Water Quality, *Exposure and Health, 3*(3-4), 203–216. https://doi.org/10.1007/s12403-011-0056-5

Kannel, P.R., Lee, S., Lee, Y.S., Kanel, S.R., Khan, S.P. (2007). Application of Water Quality Indices and Dissolved Oxygen as Indicators for River Water Classification and Urban Impact Assessment. *Environ. Monit. Assess.,* 132, 93–110. https://doi.org/10.1007/s10661-006-9505-1

Magesh, N.S., Krishnakumar, S., Chandrasekar, N., Soundranayagam, J.P. (2013). Groundwater quality assessment using WQI and GIS techniques, Dindigul district, Tamil Nadu, India. Arab. *J. Geosci.* 6, 4179–4189. https://doi.org/10.1007/s12517-012-0673-8

Mahmood, A. (2018). Evaluation of raw water quality in Wassit governorate by Canadian water quality index. *MATEC Web Conf*. 162, 122–129. https://doi.org/10.1051/matecconf/201816205020

Mladenović-Ranisavljević, I. I., y Žerajić, S. A. (2017). Comparison of different models of water quality index in the assessment of surface water quality. Int. *J. Environ. Sc. Tech., 15*(3), 665–674. https://doi.org/10.1007/s13762-017-1426-8

Mukate, S., Wagh, V., Panaskar, D., Jacobs, J. A., y Sawant, A. (2019). Development of new integrated water quality index (IWQI) model to evaluate the drinking suitability of water. *Ecol. Ind.*, 101, 348–354. https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.01.034

Noori, R., Berndtsson, R., Hosseinzadeh, M., Adamowski, J. f., Abyaneh, M. R. (2018). A critical review on the application of the National Sanitation Foundation Water Quality Index. *Environmental Pollution*, 244, 575-587 https://doi:10.1016/j.envpol.2018.10.076

Pesce, S.F., Wunderlin, D.A. (2000). Use of water quality indices to verify the impact of Córdoba City (Argentina) on Suquıa River. *Water Res. 34*(11), 2915–2926.

Sánchez, E., Colmenarejo, M.F., Vicente, J., Rubio, A., García, M.G., Travieso, L., Borja, R., (2007). Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution. *Ecol. Ind.* 7, 315–328. https://doi.org/ 10.1016/j.ecolind.2006.02.005

Salcedo-Sánchez, E. R., Garrido Hoyos, S. E., Esteller Alberich, M. V., y Martínez Morales, M. (2016). Application of water quality index to evaluate groundwater quality (temporal and spatial variation) of an intensively exploited aquifer (Puebla valley, Mexico). *Environ Monit Assess.* 188, 573 (2016). https://doi.org/10.1007/s10661-

016-5515-9

Saffran, K., Environment, A., Cash, K., Canada, E. (2001). *Canadian Water Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life CCME Water Quality Index 1.0 User's Manual.*

Sargaonkar, A., Deshpande, V. (2003). Development of an Overall Index of Pollution for Surface Water Based on a General Classification Scheme in Indian Context. *Environ Monit Assess* 89, 43–67 (2003). https://doi.org/10.1023/A:1025886025137

Štambuk-Giljanović, N. (1999). Water quality evaluation by index in Dalmatia. *Water Res. 33* (16), 3423–3440.

Sutadian, A.D., Muttil, N., Yilmaz, A.G., y Perera, B.J.C. (2016). Development of river water quality indices - a review. *Environ. Monit. Assess*, 188, 1–29. https://doi.org/10.1007/s10661-015-5050-0

Tsegaye, T., Sheppard, D., Islam, K.R., Tadesse, W., Atalay, A., y Marzen, L. (2006). Development of Chemical Index as a Measure of In-Stream Water Quality in Response to Land-Use and Land Cover Changes. *Water Air Soil Pollut*, 174, 161–179 (2006). https://doi.org/10.1007/s11270-006-9090-5

Uddin, M.G., Moniruzzaman, M., y Khan, M. (2017). Evaluation of Groundwater Quality Using CCME Water Quality Index in the Rooppur Nuclear Power Plant Area, Ishwardi, Pabna. Bangladesh. Am. *J. Environ. Prot.* 5, 33–43. https://doi.org/10.12691/env-5-2-2.

Uddin, M. G., Nash, S., y Olbert, A. I. (2021). A review of water quality index models and their use for assessing surface water quality. *Ecol Ind*, 122, 107218. doi:10.1016/j.ecolind.2020.107218

Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Ganthi, R.R., Chidambaram, S., Anandhan, P., Manivannan, R., y Vasudevan, S. (2010). Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar subbasin, Tamilnadu, India. *Environ Monit Assess*, 171, 595–609 (2010). https://doi.org/10.1007/s10661-009-1302-1

Verma, R.K., Murthy, S., Tiwary, R.K., y Verma, S. (2019). Development of simplified WQIs for assessment of spatial and temporal variations of surface water quality in upper Damodar River basin, eastern India. *Appl. Water Sci.* 0–15 https://doi.org/10.1007/ s13201-019-0893-0

Capítulo 11. Pronóstico de corto plazo de la sequía meteorológica

Ricardo Arévalo Mejía [1]
Carlos Díaz Delgado [2]
Aleida Yadira Vilchis Francés [3]
Rocío Becerril Piña [4]

Introducción

La sequía es una condición climática natural y recurrente es las diferentes regiones del mundo (Rossi *et al*., 2005; Birkel, 2006). Debido a su lento desarrollo temporal y amplia cobertura espacial, se dificulta determinar el inicio, duración y extensión del fenómeno mientras ocurre. Por tal motivo, resulta complicado definir medidas de mitigación para los severos impactos que ésta puede generar.

Existe una gran diversidad de estudios para analizar la sequía. Sin embargo, sigue considerándose como uno de los fenómenos naturales menos comprendido de la naturaleza (Fernández *et al*., 2009). Por la complejidad del fenómeno y su falta de entendimiento, los gobiernos suelen aumentar involuntariamente la vulnerabilidad ante la sequía debido a sus propias políticas de gestión de recursos hídricos (PNUD, 2004). Por lo general, éstas son acciones reactivas o de emergencia que se aplican cuando se está inmerso en el evento (Arrojo, 2008; Moneo, 2008).

De acuerdo con el reporte 2018 del panel intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (IPCC, 2008), se presentan ($P \geq 90\%$) episodios de

1 Doctor en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

2 Doctor en Ingeniería Civil. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

3 Doctora en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Red Lerma. Universidad Autónoma del Estado de México.

4 Doctora en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Red Lerma. Universidad Autónoma del Estado de México.

sequía más severos y largos en el mundo. Esto disminye la disponibilidad del agua espacio temporal y aumentar la competencia por el recurso. Ante este panorama, la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) recomienda concebir e implementar metodologías para adaptarse a la escasez de agua durante la sequía, con objeto de mitigar sus impactos.

El presente estudio requiere inicialmente de la definición del tipo de fenómeno que se analizará. Actualmente, se han adoptado cuatro tipos de sequía de acuerdo con su persistencia: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica (Paredes *et al*., 2008). La sequía meteorológica es el foco de atención en el presente capítulo dado que la única que no tiene influencia antrópica directa como otros tipos de sequía que son consecuencia de las características de ésta.

1. Modelación matemática de la sequía meteorológica

1.1 La sequía en México

En México han ocurrido episodios periódicos de sequía siempre, documentándose desde la época prehispánica. Incluso, es probable que la sequía del año 1052 haya contribuido a la caída del imperio Tolteca. Asimismo, los impactos ocurridos en 1450 reflejaron con la venta de personas a cambio de maíz, la emigración en gran escala y respuesta de la construcción de una importante obra hidráulica de conducción para traer agua a la ciudad de México desde Chapultepec. Para épocas recientes, una de las sequías más severas en México se presentó en 1995 y afectó a por lo menos 10 estados del territorio mexicano. La suma de las pérdidas, en el sector agroganadero, se elevó a más de 359 mil cabezas de ganado y casi 850 mil hectáreas destinadas a la agricultura. Lo anterior provocó que 1,200,000 campesinos abandonaran sus tierras de cultivo. Asimismo, se incrementó el conflicto entre usuarios del agua de la zona Norte del país, lo que llevó a reducir de 16 a 6 horas diarias el suministro del caudal en la ciudad de Monterrey (Escalante y Reyes, 2005).

De acuerdo con los datos de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en 2011 el 54% del territorio mexicano padecía algún grado de déficit de agua, por lo que el país vivió la sequía más grave desde 1941 (CONAGUA, 2011). La precipitación acumulada desde el 1º de enero a principios de octubre de 2011, estuvo por debajo de la media anual y, en el Norte del país, se padeció el fenómeno de sequía catalogada como "excepcional". De acuerdo con el Monitor de Sequías de América del Norte, el porcentaje de superficie nacional con sequía se clasificó como: excepcional en 6% de la República Mexicana, extrema en 15%, severa en 20% y moderada en 13% (total de 54%). Los estados más afectados se encontraron: Chihuahua, Coahuila, Nuevo León, Zacatecas,

Aguascalientes, Durango, Jalisco, San Luis Potosí y Sonora (CONAGUA, 2011).

Por otro lado, el siglo XXI prevé un incremento en la frecuencia de eventos extremos de sequías a nivel mundial (Moneo, 2008). Lo anterior provocaría un aumento en la extensión de tierras áridas y semiáridas, mayor morbilidad y mortalidad endémica por enfermedades asociadas con sequías; ocurrencia de ondas de calor más intensas y de mayor duración, así como aumento de incendios forestales no controlados. Lo anterior afectó notablemente la disponibilidad del agua para consumo humano y producción de alimentos durante episodios de sequía, con ello, incrementar la competencia por los recursos hídricos (IPCC, 2008).

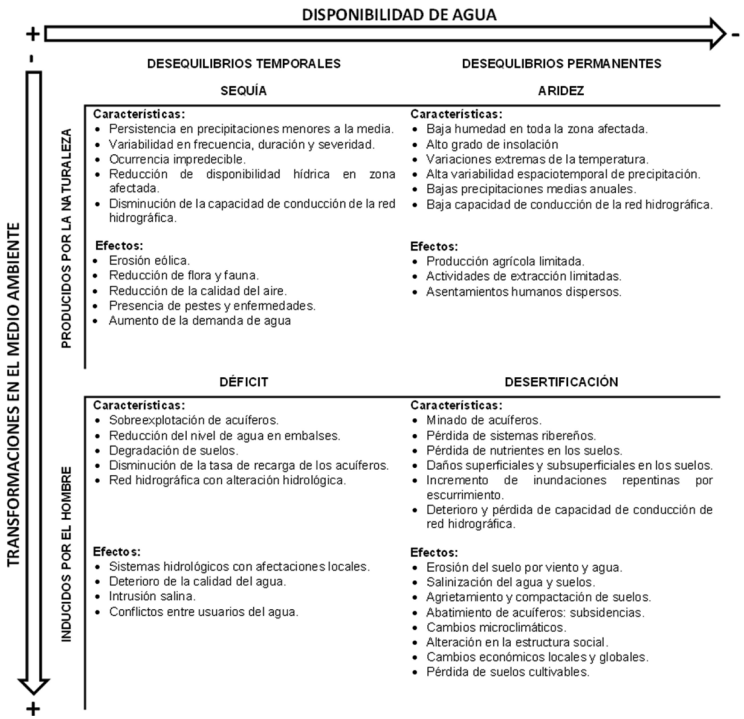
Dada esta frecuencia, algunos países experimentan desastres como la sequía, el análisis de riesgos de desastres hidroclimáticos deben ser prioridad para la sociedad y en específico, para las autoridades responsables de la gestión de los recursos hídricos. Particularmente en la planificación, a través del conocimiento y análisis del fenómeno, así como la preparación y respuesta ante estos desastres (PNUD, 2004). De ello se deriva cada vez más el interés generalizado para el desarrollo de herramientas que apoyan las técnicas de análisis y caracterización de las sequías (Escalante y Reyes, 2005). Sin embargo, la tendencia de los gobiernos y sociedad ante estos fenómenos sigue siendo de tipo reactivo, es decir, actúa sólo ante situaciones de crisis o de emergencia. En general, estas acciones no resultan medidas planeadas y mucho menos las más adecuadas (Arrojo, 2008; Moneo, 2008) pues finalmente el costo e impactos de esta forma de actuar resulta ser el más elevado y con mayor sufrimiento para la población.

1.1 Definición y tipos de sequía

Antes de definir al fenómeno de la sequía, es necesario señalar la diferencia conceptual entre aridez y sequía, ya que ambos fenómenos se caracterizan por la ausencia de agua. La aridez es un estado climático permanente, mientras que la sequía, es un proceso extremo que se presenta en tiempo y espacio (Bâ *et al*., 1995). La terminología asociada con la aridez y sequía generan confusión semántica, por lo que es necesario realizar una clasificación de conceptos a través de una escala de sequedad con respecto a la disponibilidad de agua y transformación del medio ambiente (Bâ *et al*., 1995).

En la Figura 1 se muestra la sequía como fenómeno temporal debido a causas naturales. La aridez es una condición permanente donde hay menos disponibilidad de agua. Asimismo, se observan otros dos términos: "déficit" y "desertificación" ambos, inducidos por las actividades del hombre, donde el primero es una condición temporal y el segundo resulta ser permanente con menor disponibilidad de recursos hídricos.

Figura 1. Grados de sequedad



Fuente: adaptada de Bâ et al. (1995).

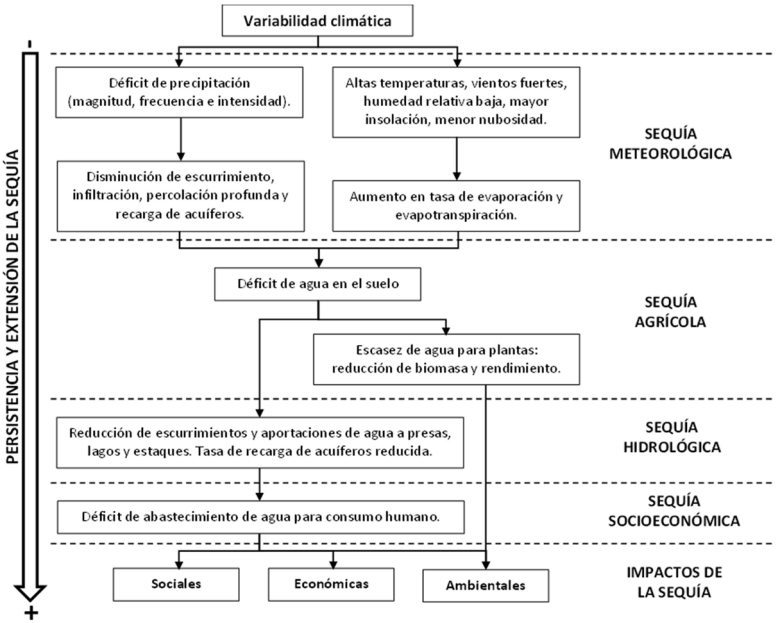
Entonces, la sequía se considera como una perturbación natural del clima (Rossi *et al*., 2005), un fenómeno hidrometeorológico complejo (Fernández, 1997), recurrente (Birkel, 2006), inevitable (Bravo e*t al*., 2006), impredecible con certeza, de amplia cobertura espacial y de lento desarrollo temporal (Alfonso, 2006) que puede presentarse en cualquier parte del mundo y bajo cualquier régimen pluviométrico (Bordi y Sutera, 2002; González, 2005; González y Valdés, 2006; Crespo, 2006).

Aún con los estudios desarrollados hoy en día sobre la materia, la sequía sigue siendo uno de los fenómenos menos comprendidos entre los peligros naturales que afectan más a la Tierra (Fernández *et al*., 2009). Diferentes estudios sobre sequías fueron realizados en las últimas décadas como respuesta a la ocurrencia de estos eventos en diversas partes del mundo, por lo que se han presentado múltiples definiciones de sequía (Tsakiris *et al*., 2007). En general, se define como un período prolongado de escasez de recursos hídricos muy por debajo de niveles normales registrados, provocando efectos adversos so-

bre los sistemas de producción de recursos (Fernández, 1997; Cebrián, 1999; Valiente, 2001; Pereira y Paulo, 2006; IPCC, 2008).

De acuerdo con González (2005) plantea a la sequia como la clasificación que toma en cuenta los factores que la originan y las consecuencias más notorias que se presentan cuando sucede el evento. Esta clasificación se adopta a nivel mundial y se presenta a través de cuatro categorías, interrelacionadas entre sí, de manera temporal y espacial, las cuales son: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica (Hallack-Allegria y Watkins, 2006; Paredes *et al*., 2008).

Figura 2 modelo conceptual de la sequía: sus orígenes, evolución e impactos. Donde (-) significa menos persistencia y extensión de sequía; y (+) significa más persistencia y extensión del fenómeno



Fuente: adaptada de Valiente (2001) y González (2005).

Sequía meteorológica: período de tiempo con condiciones meteorológicas anormalmente secas, suficientemente prolongado donde se considera que la falta de precipitación causa un grave desequilibrio hidrológico (OMM, 1983).

Sequía agrícola: período de tiempo en el cual no existe la suficiente humedad en el suelo para permitir el desarrollo de un determinado cultivo en cualquiera de sus fases de crecimiento (Valiente, 2001).

Sequía hidrológica: período durante el cual los caudales (superficiales y/o subterráneos) son insuficientes para satisfacer los usos establecidos bajo un determinado sistema de gestión de aguas (Valiente, 2001).

Sequía socioeconómica: se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños económicos en la población de la zona afectada por la escasez de lluvia (Valiente, 2001).

En la Figura 2 se muestra un modelo conceptual de la ocurrencia de la sequía, donde se observan las causas que la originan, cómo evoluciona en el tiempo de acuerdo con la persistencia y extensión de ésta, así como los impactos que generan en el medio ambiente.

1.1.1 Sequía meteorológica

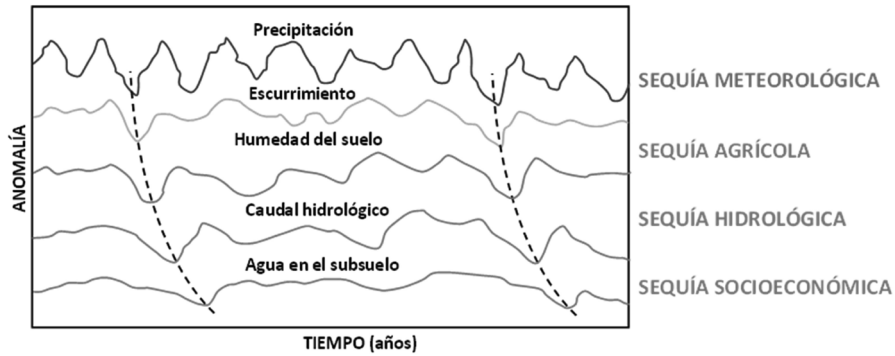
Para estudiar la sequía, primero debe definirse con qué tipo trabaja de acuerdo con su clasificación. Como ya se mencionó actualmente existe una clasificación del fenómeno aceptada a nivel mundial que consta de 4 tipos: meteorológica, agrícola, hidrológica y socioeconómica. Este tipo de clasificación refleja el proceso de evolución y ocurrencia progresiva del fenómeno de acuerdo con su persistencia y alcance.

La Figura 3 muestra cómo se propagan las anomalías pluviométricas hacia los diferentes niveles del ciclo hidrológico. Se percibe que el primer tipo de sequía que se presenta es por causas puramente climáticas, como la variabilidad de la precipitación (sequía meteorológica); lo anterior conlleva a presentar un déficit de humedad en el suelo, lo que afecta la vegetación en general (sequía agrícola). Cuanto más tiempo dura la sequía el déficit hidrológico presenta disminución en caudales de ríos, nivel de lagos y embalses (sequía hidrológica). Finalmente, existen impactos económicos y sociales, aunados a los ambientales que afectan las actividades productivas del ser humano por la duración del fenómeno (sequía socioeconómica) y, probablemente, se altere la paz social y gobernabilidad de la región afectada.

Por lo tanto, para la comprensión del fenómeno, debe comenzarse con el análisis del primer tipo de sequía que se presenta, es decir, la sequía meteorológica. Este tipo permite conocer el régimen climatológico que afecta una región donde se presenta el fenómeno. Además, no se ve afectada directamente por las acciones productivas del hombre, sino que se debe a causas puramente naturales de variabilidad climática y, en su caso, exacerbadas por cambio climático. En otras palabras, la sequía agrícola, hidrológica y socioeconómica, son consecuencia de la sequía meteorológica afectadas por las políticas de gestión de recursos hídricos de cada región. Por esta razón, el presente estudio está enfocado exclusivamente al análisis de la sequía meteorológica. Asimismo, es importante subrayar que, para el estudio de otro tipo de sequías, debe contarse con información de ciclos vegetativos, demandas de agua para los diferentes usos, registros de caudales en ríos, gestión de operación de caudales regulados en ríos y de volúmenes de agua almacenados en presas,

así como su política de operación generalmente este tipo de datos suelen ser inexistentes o de difícil acceso.

Figura 3 Desfase temporal en la propagación de anomalías pluviométricas hacia los diversos niveles del ciclo hidrológico



Fuente: adaptada de Valiente (2001).

1.1.2 Índice estandarizado de precipitación (SPI)

Un indicador de sequía es la escala de variable meteorológica, hidrológica, agrícola o socioeconómica que provee una caracterización de una deficiencia o estrés hídrico potencial relacionado con la sequía. La estimación de un índice comprende la inclusión de dos o más indicadores, del cual se deriva información con plusvalía relacionada con la sequía a través de comparar las condiciones de precipitación actuales con las condiciones correspondientes en el pasado (Eslamian *et al.*, 2017; Yihdego *et al.*, 2019). Analizar la sequía meteorológica presenta una estimación de índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés). Este se basa en la probabilidad de la ocurrencia de precipitación y asume que las condiciones de humedad del suelo son una respuesta a las anomalías de precipitación en un período corto de tiempo. En tanto que, para el agua subterránea, agua almacenada y corrientes de agua, el impacto se refleja en anomalías de precipitación en períodos de largo plazo (Crespo, 2006). Su valoración numérica es: $[-\infty, -2[$ sequía extrema; $[-2, -1.5[$ sequía severa; $[-1.5, -1[$ sequía moderada; $[-1, \infty[$ condiciones normales]. Matemáticamente, el índice se define como:

$$SPI = \pm[t - (C_0 + tC_1 + t^2C_2)/(1 + td_1 + t^2d_2 + t^3d_3] \quad \text{Ecuación 1}$$

$$t = \sqrt{\ln\left[\frac{1}{(H(x))^2}\right]} \quad para\ 0 < H(x) \leq 0.5 \quad \text{Ecuación 2}$$

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad \text{Ecuación 3}$$

$$q = {}^{m}/_{n} \quad \text{Ecuación 4}$$

$$G(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}\int_0^x x^{\alpha-1}e^{-x/\beta}dx \quad \text{Ecuación 5}$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad \text{Ecuación 6}$$

$$\alpha = \frac{1}{4A}\left[1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right] \quad \text{Ecuación 7}$$

$$A = \ln\bar{x} - \frac{\sum \ln(x)}{n} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde: C_0=2.515517; C_1=0.802853; C_2=0.010328; d_1=1.432788; d_2=0.189269 y d_3=0.001308, *G(x)* es la función de distribución de probabilidad Gamma, *x* es la variable precipitación, $\bar{x}$ es el promedio de la precipitación x, $\hat{\alpha}$ es el estimador del parámetro de forma de la curva de la función Gamma; para x>0, $\hat{\beta}$ es el estimador del parámetro de escala de la función Gamma, para x>0, *A* es una variable auxiliar, *H(x)* es la función de distribución Gamma incompleta, *q* es la probabilidad de que ocurra un valor de precipitación igual con cero, *1-q* es la probabilidad de que no ocurra un cero, *m* es el número de ceros en una serie de tiempo, *n* es el total de valores de un registro de la serie de tiempo, *t* es una variable de transformación y C_i, d_i son constantes. Debido *a* que la función Gamma tiende a infinito con valores iguales a 0, se requiere hacer el ajuste a esta distribución con una serie de precipitación no nula (P_i > 0 mm). Mientras el ajuste de probabilidad, debe realizar una serie de precipitación que incluya las observaciones con P*i* = 0 mm (OMM, 2016).

2. Pronóstico hidrológico

Los hidrólogos, en la práctica, lidian frecuentemente con la baja disponibilidad de datos hidro-climáticos históricos (muestra) al analizar una serie de tiempo. Esta muestra consiste en la cantidad limitada de realizaciones en la población proveniente del proceso hidrológico en cuestión. Cuando una serie de tiempo hidrológica es caracterizada por parámetros estadísticos y probabilísticos, la serie misma representa una probabilidad de ocurrencia de las posibles realizaciones. Esta probabilidad de ocurrencia de serie de tiempo hi-

drológica es considerada una realización. Todas las posibles realizaciones del proceso hidrológico es lo que constituye la población (esto dicho en términos estadísticos). El principal objetivo de los estudios hidrológicos comprende y describe cuantitativamente la población, al igual que los procesos que la generaron basados en una cantidad limitada de muestras. También las predicciones futuras y simulaciones alrededor de una serie de tiempo hidrológica pueden ser obtenidas al aplicar principios, métodos y herramientas probabilísticas como estadísticas basadas en los datos históricos. Cuando una serie de tiempo hidrológica es analizada de esta manera, al análisis se le conoce como "modelación estocástica" de la serie del tiempo y parámetros que la describen como "parámetros estocásticos" (Machiwal y Kumar, 2012).

Los modelos estocásticos son empleados sin considerar la naturaleza física de la serie de tiempo (Box y Jenkins, 1976; Shahin *et al.*, 1993). Sin embargo, cabe resaltar que cada una de las observaciones históricas del fenómeno en estudio contiene las características específicas que le dieron origen y en conjunto se encuentra la génesis y patrones de comportamiento del propio fenómeno hidrológico (población). En hidrología, los modelos estocásticos más comunes son: puramente aleatorios (white noise), autorregresivos (AR), de media móvil (MA), autorregresivos de media móvil (ARMA), autorregresivos integrados de media móvil (ARIMA) y todas las derivaciones de los modelos ARMA y ARIMA (e.g: autorregresivos discretos de media móvil [DARMA], autorregresivos integrados de media móvil con variables exógenas [ARIMAX], autorregresivos integrados de media móvil estacional [SARIMA], entre otras).

2.1 Modelos ARMA

La mayoría de las series de tiempo consisten en datos dependientes, en el sentido que un dato puede estimar un coeficiente o un conjunto de coeficientes que describen los datos consecutivos en una serie de espaciamiento temporal. Cada dato de la serie de tiempo está conformado por un componente de error estadístico aleatorio y una combinación lineal de los datos precedentes. Lo anterior expresado por Box y Jenkins (1976) como:

$$x_t = \bar{x} + \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \cdots + \phi_p x_{t-p} + \varepsilon_t \qquad \text{Ecuación 9}$$

Donde: x_t es el valor de la variable x en el tiempo t; $x_{t-1}, x_{t-2}, x_{t-3}$ son los valores de la variable x en los tiempos t-1,t-2,t-3, respectivamente; $\bar{x}$ es una constante (generalmente expresada como la media muestral); $ø_1, ø_2, ø_3$ son los coeficientes del modelo de autorregresión y ε_t es el componente de error estadístico aleatorio.

El orden del proceso de autorregresión está definido por el máximo valor de p, para el cual $\Phi_p=0$. Así, para p=1 el proceso de autorregresión es de pri-

mer orden, para p=2 segundo orden y así sucesivamente. Por tanto, un modelo de autorregresión se denota como AR(p).

Condición de estacionariedad: el proceso de autorregresión es estable cuando los parámetros del modelo permanecen dentro de un determinado rango. De lo contrario, la influencia de los datos previos se acumula y los valores de la variable x_t tienden a infinito; es decir, la serie no sería estacionaria (Montgomery *et al.*, 1990).

Además de la dependencia serial de los datos observados, cada uno de ellos puede verse afectado por los efectos del error estadístico aleatorio (ε_t), el cual no puede ser tratado en los modelos autorregresivos. El proceso de media móvil puede ser expresado como:

$$x_t = \bar{x} + \varepsilon_t - \theta_1\varepsilon_{t-1} - \theta_2\varepsilon_{t-2} - \theta_3\varepsilon_{t-3} - \cdots \qquad \text{Ecuación 10}$$

Donde: x_t es el valor de la variable x en el tiempo t; $\bar{x}$ es la media muestral; ε_t,ε_{t-1},ε_{t-2},ε_{t-3} son los errores estadísticos aleatorios en los tiempos t,t-1,t-2,t-3, respectivamente; $ø_1$,$ø_2$,$ø_3$ son los coeficientes del modelo de media móvil.

El orden del proceso de media móvil está definido por el máximo valor de q para el cual θ_q=0. Así, para q=1 el proceso de media móvil es de primer orden, para q=2 de segundo orden y así sucesivamente. Por tanto, un modelo de media móvil se denota como MA(q).

Condición de invertibilidad: existe una dualidad entre el proceso de autorregresión y el proceso de media móvil (Montgomery *et al.*, 1990) dado que el proceso MA(q) no está determinado únicamente por su función de autocorrelación. Sin embargo, se requiere de una relación única entre el proceso MA(q) y su función de autocorrelación, ya que los coeficientes de MA(q) son sólo estimados a través de la función empírica de autocorrelación. Box y Jenkins (1976) resolvieron el problema al introducir el concepto de condición de invertibilidad, en la cual indican que un proceso MA(q) puede ser reescrito como un proceso AR(∞) si los coeficientes de proceso de media móvil permiten la inversión. Nótese que esta condición es análoga a la condición de estacionariedad del proceso de autorregresión.

Los procesos de autorregresión AR(p) y de media móvil MA(q) son casos particulares de un proceso autorregresivo de media móvil ARMA de orden (p,q), el cual se denota como ARMA(p,q) y representa un proceso estocástico real expresado como:

$$\begin{aligned} x_t = \bar{x} &+ \phi_1 x_{t-1} + \phi_2 x_{t-2} + \cdots + \phi_p x_{t-p} \\ &+ \varepsilon_t - \theta_1\varepsilon_{t-1} - \theta_2\varepsilon_{t-2} - \cdots - \theta_q\varepsilon_{t-q} \end{aligned} \qquad \text{Ecuación 11}$$

Un modelo ARMA(p,0) es equivalente a un modelo AR(p), mientras que un modelo ARMA(0,q) es equivalente a un MA(q).

2.2 Modelos ARIMA

El modelo general ARIMA incluye parámetros autorregresivos y de media móvil; explícitamente incluye una diferencia temporal en la formulación del modelo (Box y Jenkins, 1976). Los tres parámetros específicos de un modelo ARIMA son: parámetros de autorregresión (*p*), el número de diferencias temporales (*d*) y parámetros de media móvil (*q*). Por lo anterior, los modelos ARIMA pueden ser expresados como ARIMA(*p,d,q*) que denota un modelo con p parámetros de autorregresión y q parámetros de media móvil que han sido diferenciados *d* veces.

Los modelos ARIMA son empleados para detallar procesos estocásticos no estacionarios. Sus predecesores (AR, MA y ARMA) asumen que la serie es estacionaria, es decir, se presente abajo de las siguientes tres condiciones en la serie de tiempo: i) la media de los datos permanece constante; ii) la varianza es constante y iii) no hay estacionalidad en la serie analizada. Sin embargo, las variables de los procesos hidrológicos raramente presentan condiciones invariantes en el tiempo. De esta forma, los modelos ARIMA se han ganado popularidad y confianza en el modelado de estos fenómenos al introducir el parámetro de diferenciación *d*.

2.2.1 Proceso de diferenciación

El proceso de diferenciación permite conocer los cambios ocurridos entre observaciones consecutivas en las series originales. Esto ayuda a estabilizar la media ya que se remueven los cambios en la serie. Lo anterior tiene como efecto eliminar (o reducir) la estacionalidad y la tendencia (lineal o no) de la serie analizada. Esta técnica es ampliamente usada para analizar series de datos no estacionarios en campos financieros y de econometría. Por ende, los modelos ARIMA adoptan la diferenciación para convertir una serie de tiempo no estacionaria en una estacionaria. Este procedimiento se define como:

$$x_t' = x_t - x_{t-1} \qquad \text{Ecuación 12}$$

Donde: x_t' es el dato de diferenciación de primer orden en el instante *t*; x_t es la observación de la serie de tiempo en el instante *t* y x_{t-1} es la observación en el instante *t*-1.

Cuando los datos diferenciados de primer orden no parecen ser estacionarios, se procede a la diferenciación de segundo orden que está expresada como:

$$x_t'' = x_t' - x_{t-1}' = (x_t - x_{t-1}) - (x_{t-1} - x_{t-2}) = x_t - 2x_{t-1} + x_{t-2}$$ Ecuación 13

También es posible obtener la diferencia de una observación con otra del mismo período estacional. Este tipo de diferencia se conoce como diferenciación estacional y se define como:

$$x_t' = x_t - x_{t-m}$$ Ecuación 14

Donde: x_t' es el dato de diferenciación de primer orden en el instante *t;* x_t es la observación de la serie de tiempo en el instante *t;* x_{t-m} es la observación en el instante *t-m y m* es cualquier otro instante ocurrido antes de t dentro del mismo período estacional en cuestión. El segundo orden de una diferencia estacional es:

$$x_t'' = x_t' - x_{t-m}' = (x_t - x_{t-m}) - (x_{t-1} - x_{t-m-1}) = x_t - x_{t-1} - x_{t-m} + x_{t-m-1}$$ Ecuación 15

Para conocer si una serie requiere de procedimientos de diferenciación, se requiere saber si la serie es estacionaria o no. La gráfica de la serie de tiempo es una buena forma de reconocer este caso. Sin embargo, se pueden emplear numerosas pruebas estadísticas de no-estacionalidad, por ejemplo: la prueba de Dickey-Fuller (Dickey y Fuller, 1979). Esta prueba toma como hipótesis nula la presencia de una raíz unitaria (*unit root*) en un modelo AR(*p*) unitario (Ecuación 16), es decir, se debe cumplir la condición $ø_1=1$ en un modelo unitario del tipo AR(p) para que la serie sea no estacionaria. El caso estacionario (hipótesis alternativa) se presenta cuando $ø_1 \neq 1$.

$$x_t = \phi_1 x_{t-1} + \varepsilon_t$$ Ecuación 16

La primer diferencia de la Ecuación 16 puede ser expresada como:

$$x_t' = (\phi_1 - 1)x_{t-1} + \varepsilon_t = \delta x_{t-1} + \varepsilon_t$$ Ecuación 17

Donde δ es conocida como raíz unitaria (*unit root*) y $\delta = ø_1 - 1$. Existen tres variantes principales de esta prueba, las cuales son:

- Test de raíz unitaria (Ecuación 16)
- Test de raíz unitaria con factor de cambio externo (*external drift*).

$$x'_t = a_0 + \delta x_{t-1} + \varepsilon_t \qquad \text{Ecuación 18}$$

Test de raíz unitaria con factor de cambio externo y tendencia determinística en el tiempo.

$$x'_t = a_0 + a_1 t + \delta x_{t-1} + \varepsilon_t \qquad \text{Ecuación 19}$$

Cada versión de la prueba tiene su propio valor crítico que depende del tamaño de la muestra. En cada caso, la hipótesis nula menciona que existe una raíz unitaria δ=0. La prueba tiene un bajo desempeño estadístico y frecuentemente no es posible distinguir entre un proceso con una verdadera raíz unitaria (δ=0) y un proceso con pseudo raíz unitaria ($\delta \approx 0$). Este problema es conocido como "equivalencia de observación cercana" (Elder y Kennedy, 2001).

La lógica detrás de la prueba es: si la serie de datos x es estacionaria (tendencia estacionaria), entonces se tiene una tendencia que regresa a una constante en cualquier instante en el tiempo (tendencia determinística) que es la media de la serie. Entonces, magnitudes grandes tienden a ser seguidas por magnitudes pequeñas (cambios negativos) y viceversa (cambios positivos). Por tanto, cualquier muestra de la serie es un buen predictor del siguiente cambio con un coeficiente negativo. La serie no estacionaria tendría cambios positivos y negativos que ocurren con probabilidades que no dependen de la muestra tomada de la serie x. Si una persona tomara una caminata aleatoria, el punto donde se encuentre hoy no afectaría al camino que tome mañana.

2.2.2 Denotación *Backshift* (B)

Comúnmente se expresa el término *Backshift* para denotar la relación:

$$Bx_t = x_{t-1} \qquad \text{Ecuación 20}$$

Del resultado obtenido en la Ecuación 13, se puede llegar fácilmente a expresar el proceso de diferenciación como la potencia d de un binomio. Por lo que el proceso de diferenciación queda expresado como:

$$(1 - B)^d x_t \qquad \text{Ecuación 21}$$

Donde: d es el orden de la diferenciación de la serie; B es el término *Back-shift* que permite hacer uso de la Ecuación 20 y x_t es la observación de la serie de tiempo en el instante t.

2.2.3 Función de autocorrelación y autocorrelación parcial

Después de diferenciar una serie de tiempo, es necesario verificar si existe alguna autocorrelación residual. Esto lleva a fijar los parámetros p y q de un modelo ARIMA a través de la función de autocorrelación (ACF por sus siglas en inglés) y la función de autocorrelación parcial (PACF, por sus siglas en inglés). La autocorrelación expresa en esencia el grado de dependencia temporal entre las observaciones de una serie de datos. De hecho, es un proceso de autocomparación que expresa la correlación lineal entre una serie de datos (con incrementos equidistantes en el tiempo) y la misma serie con un desfase temporal (Jenkins y Watts, 1968). Si $x_0, x_1, x_2, \ldots, x_n$ son realizaciones de un proceso estocástico estacionario, la covarianza entre x_t y su valor x_{t-k}, desfasado en un intervalo de tiempo k se conoce como la autocovarianza poblacional (γ_k) y se expresa matemáticamente como:

$$\gamma_k = E[(x_t - \mu)(x_{t-k} - \mu)] \qquad \text{Ecuación 22}$$

Donde: x_t es la observación en el instante t; d es el desfase temporal y μ es la media poblacional.

Por tanto, la autocorrelación poblacional (ρ_d) es el cociente entre la autocovarianza poblacional (γ_d) entre la varianza de la serie de tiempo:

$$\rho_k = \frac{\gamma_k}{\mathrm{Var}(x)} \qquad \text{Ecuación 23}$$

Si se toma una muestra de la población de tamaño n, la autocorrelación muestral se define como:

$$r_k = \frac{\frac{1}{n-1}\sum_{t=1}^{n-k}\left(x_t - \bar{x}\right)\left(x_{t-k} - \bar{x}\right)}{s_x^2} \qquad \text{Ecuación 24}$$

Donde: r_k es la autocorrelación muestral n es el tamaño de la muestra; $\bar{x}$ es la media muestral y s_x^2 es la varianza muestral.

Para d=0, la Ecuación 22 y Ecuación 23 resultan en ρ_k=r_k=1. Si el desfase de tiempo k se incrementa, el número de pares empleados para estimar r_k se reduce. Por tanto, es una buena práctica que se limite el número máximo de desfase temporal en función del tamaño de la muestra (Matalas, 1967):

$$d_{max} \epsilon [0.1n, 0.25n]$$

Ecuación 25

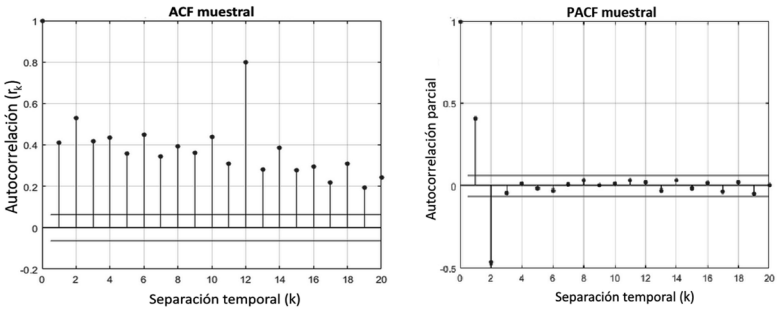
El error estándar (SE) de la autocorrelación muestral queda definido como:

$$SE(r_k) = \sqrt{\frac{1}{n}\left(1 + 2\sum_{j=1}^{k}(r_j)^2\right)}$$

Ecuación 26

Al estimar el coeficiente de autocorrelación muestral para diferentes valores de desfase temporal (k), se puede generar una gráfica de tallos conocida como correlograma (Figura 4a).

Figura 4 correlogramas muestrales para desfases temporales (k) de 0 a 20. La línea horizontal representa el error estándar de estimación: a) correlograma muestral y b) correlograma parcial



Fuente: elaboración propia.

La autocorrelación parcial es la cantidad de correlación entre una variable y ella misma (con un desfase temporal k) que no está explicada por las correlaciones con todos los órdenes de desfase superiores. Suponga una serie de tiempo *X*, la autocorrelación de la serie *X* en un desfase *k*=1; el coeficiente de correlación entre x_t y x_{t-1}, que presuntamente es la autocorrelación entre x_{t-1} y x_{t-2}. Pero, si x_t está correlacionado con x_{t-1} y x_{t-1} tambien se correlaciona con x_{t-2}; entonces encontraremos correlación entre x_{t-1} y x_{t-2}. De hecho, la correlación en el desfase *k*=1 se "propaga" al desfase *k*=2 y a desfases de orden superior. La autocorrelación parcial en el desfase de orden 2 es, por tanto, la diferencia entre la correlación actual del desfase 2 y la correlación esperada debido a la propagación de correlación del desfase 1.

La estimación de la PACF requiere solucionar las ecuaciones de Yule-Walker con respecto a las autocorrelaciones. Sin embargo, se puede realizar una estimación ajustando modelos sucesivos de autorregresión de órdenes 1, 2, …, por mínimos cuadrados. Para mayores detalles, se remite al lector a Hamilton (1994).

El parámetro p de un modelo AR(p) se obtiene como el valor que PACF corta al error estándar (SE) de la función dejando al resto de los valores contenidos dentro de SE.

Si PACF muestra un corte súbito (e.g: Figura 4b) mientras que ACF decae lentamente (e.g: Figura 4a) se dice que la serie estacionaria muestra una "firma AR". Esto significa que el patrón de autocorrelación puede ser explicado fácilmente adicionando términos AR que MA. La firma AR comúnmente asociada con correlaciones positivas en el desfase de primer orden (k=1); la cual tiende a incrementarse en series que han sido subdiferenciadas. Lo anterior se debe a que un término AR puede actuar como "diferenciación parcial" en los modelos ARIMA. Así, una serie ha sido subdiferenciada, es decir, el patrón no estacionario de correlación positiva no fue eliminado completamente; la serie demandará una diferenciación parcial mostrando una firma AR.

En principio, cualquier patrón de autocorrelación puede ser removido de una serie estacionaria agregando suficientes términos de autoregresión (AR) mientras que PACF muestra cuántos de estos términos deberán agregarse para eliminarla completamente. Sin embargo, no siempre es la forma más sencilla de explicar un cierto patrón de autocorrelación. En algunas ocasiones es más eficiente agregar términos de error estadístico (MA). La ACF juega el mismo rol para el parámetro q de un modelo MA(q) que la PACF para los modelos AR(p). Es decir, la ACF muestra la cantidad de términos de error estadísticos (MA) que es necesario adicionar para eliminar completamente la autocorrelación de series diferenciadas. En este caso, se dice que la serie muestra una "firma MA", lo que implica un patrón de autocorrelación para ser explicado más fácilmente adicionando términos MA que AR.

La firma MA está comúnmente asociada con autocorrelaciones negativas en el desfase de primer orden (k=1), la cual tiende a incrementarse en series que han sido sobrediferenciadas.

Lo anterior se debe al término MA que cancela parcialmente un orden de diferenciación en los modelos ARIMA. Así, esta serie sobrediferenciada, es el el patrón de correlación negativa introducida; demandando parcialmente la diferencia mostrada en la firma MA.

2.2.4 Conceptualización de los modelos ARIMA

Expuesto lo anterior, se llega a la formulación de los modelos ARIMA (Machiwal y Kumar Jha, 2012) como:

$$\left(1-\phi_1 B-\cdots-\phi_p B^p\right)(1-B)^d x_t = c+\left(1+\theta_1 B+\ldots+\theta_q B^q\right)\varepsilon_t \qquad \text{Ecuación 27}$$

Donde: $\left(1-\phi_1 B-\cdots-\phi_p B^p\right)x_t$ representa al modelo $AR(p)$; $(1-B)^d$ representa el proceso de diferenciación de orden d; $\left(1+\theta_1 B+\ldots+\theta_q B^q\right)\varepsilon_t$ representa al modelo $MA(q)$ y c es una constante.

La selección del par de parámetros (p,q) puede parecer un reto. Sin embargo, en la literatura se muestran guías para seleccionar dicho par, que están basadas en la minimización de la varianza de la estimación. Machiwal y Kumar Jha (2012) aportan las recomendaciones del cuadro 1.

Cuadro 1. Guía para identificar los parámetros de un modelo ARIMA basados en las características de la ACF y la PACF

Parámetro	Características de la ACF	Características de la PACF
Uno autorregresivo (p)	Decaimiento exponencial	Pico en desfase 1 sin correlación con desfases posteriores.
Dos autorregresivos (p)	Forma senoidal o una serie de decaimientos exponenciales.	Decaimiento exponencial
Uno de medias móviles (q)	Pico en desfase 1 sin correlación con desfases posteriores.	Decaimiento exponencial
Dos de medias móviles (q)	Picos en desfases 1 y 2 sin correlación con desfases posteriores.	Forma senoidal o una serie de decaimientos exponenciales.
Uno autorregresivo (p) y uno de medias móviles (q)	Decaimiento exponencial comenzando en desfase 1.	Decaimiento exponencial comenzando en desfase 1.

Fuente: adaptada de Machiwal y Kumar Jha (2012).

2.2.5 Modelos SARIMA

Un modelo ARIMA estacional (SARIMA) es una generalización y extensión de un modelo ARIMA regular. Los modelos SARIMA son empleados en series de tiempo cuyos patrones se repiten estacionalmente a lo largo del tiempo. Análogamente, los parámetros del modelo se obtienen de la misma forma un modelo ARIMA regular. Por otro lado, un modelo SARIMA denota como SARIMA(p,d,q)(p_s,d_s,q_s) que describe un modelo que incluye p parámetros autorregresivos, p_s parámetros autorregresivos estacionales, q parámetros de medias móviles, q_s parámetros de medias móviles estacionales; una diferenciación ordinaria de orden d y una diferenciación ordinaria estacional de orden d_s. Este último denota la periodicidad de la estacionalidad en la serie (e.g: 12 períodos). Estos modelos se expresan como:

$$\left(1-\phi_p B^p\right)\left(1-\Phi_{p_s} B^{p_s}\right)(1-B^{d_s})(1-B)^d x_t = c + \left(1+\theta_q B^q\right)\left(1+\Theta_{q_s} B^{q_s}\right)\varepsilon_t \qquad \text{Ecuación 28}$$

Donde: $\left(1-\phi_p B^p\right)$ representa un proceso $AR(p)$ regular; $\left(1-\Phi_{p_s} B^{p_s}\right)$ representa un proceso $AR(p_s)$ estacional que también puede ser representado como $SAR(p)$; $(1-B^{d_s})$ representa un proceso de diferenciación estacional de orden d_s; $(1-B)^d$ representa un proceso de diferenciación regular de orden d; x_t es la observación de la serie de tiempo en el instante t; $\left(1+\theta_q B^q\right)$ representa un proceso $MA(q)$ regular; $\left(1+\Theta_{q_s} B^{q_s}\right)$ representa un proceso $MA(q_s)$ estacional que también puede ser representado como $SMA(q)$; ε_t son los errores estadísticos aleatorios y c es una constante.

2.2.6 Bondad de ajuste

Para seleccionar algún modelo adecuado, de la gama de posibilidades que el par de parámetros (p, q) pueden dar, se emplea el Criterio de Información de Akaike (Ecuación 21) modificada por Brockwell y Davis (1991):

$$\text{AIC}(p,q) = \log\left(\hat{\sigma}^2_{p,q}\right) + 2\frac{p+q+1}{n+1} \qquad \text{Ecuación 29}$$

Donde: $\text{AIC}(p,q)$ es el Criterio de Información de Akaike; $\hat{\sigma}^2_{p,q}$ es la varianza de estimación del modelo ARIMA; p es el número de términos AR; q es el número de términos MA y n es el tamaño de muestra de la serie modelada.
Otro criterio de minimización es el Criterio de Información Bayesiano (BIC, por sus siglas en inglés) que de acuerdo con Brockwell y Davis (1991) se define como:

$$\text{BIC}(p,q) = \log\left(\hat{\sigma}^2_{p,q}\right) + \frac{(p+q)\log(n+1)}{n+1} \qquad \text{Ecuación 30}$$

Donde: $\text{BIC}(p,q)$ es el Criterio de Información Bayesiano; $\hat{\sigma}^2_{p,q}$ es la varianza de estimación del modelo ARIMA; p es el número de términos AR; q es el número de términos MA y n es el tamaño de muestra de la serie modelada.

Cabe señalar que la varianza estimada por el modelo $\left(\hat{\sigma}^2_{p,q}\right)$ se vuelve menor en cuanto la suma $(p+q)$ se incremente. Por tanto, la suma del número de parámetros empleados en los modelos ARIMA sirve como penalización de valores muy grandes de p y q y previene de sobre ajustar los datos al seleccionar los valores de estos parámetros. No hay una razón específica para un cierto criterio (AIC o BIC) para una condición específica. Sin embargo, se debe remarcar que el AIC tiende a no subestimar el orden del modelo mientras que el BIC es, generalmente, preferido en tamaños grandes de muestras (Schlittgen y Streitberg, 2001).

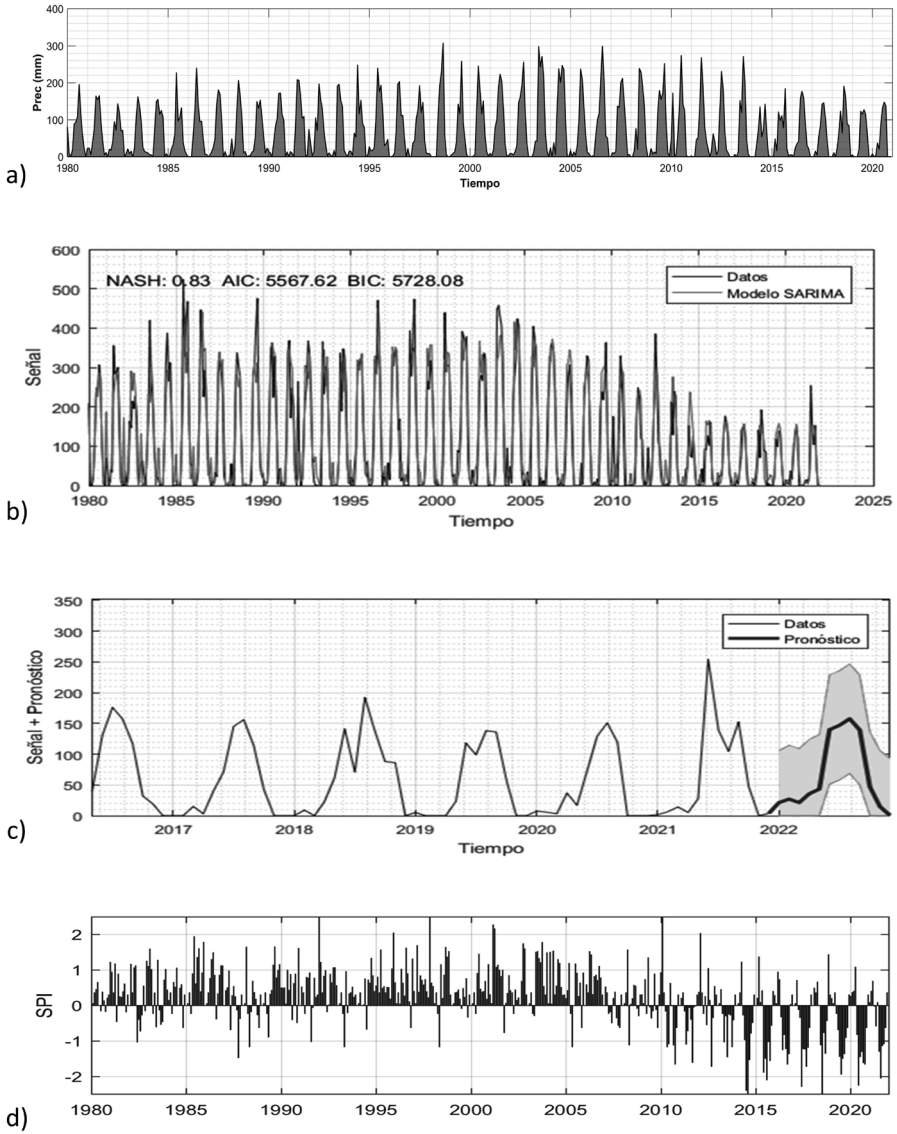
3. Estudio de caso: pronóstico de la sequía meteorológica en Valle de Bravo, 2022.

A fin de ilustrar la aplicación del marco metodológico, se estima el índice SPI para la cuenca de Valle de Bravo en 2022 de manera mensual. Cabe mencionar que la cuenca de Valle de Bravo forma parte de la del río Balsas y es una región con disponibilidad hídrica limitada. Sin embargo, de esta cuenca se efectúa un trasvase hacia la cuenca del Valle de México, a través del sistema de conducción denominado Cutzamala, con un volumen anual del orden de los 490 hm^3. Este caudal es conducido por una tubería que recorre más de 127 km y eleva el agua a más de 1100 m (Vilchis-Francés *et al*., 2015). La importancia del análisis del pronóstico de sequía para la cuenca de Valle de Bravo radica en la posible fragilidad del sistema para mantener el suministro de agua a la ciudad de México y zonas conurbadas insertas en la cuenca de México. La insuficiencia de suministro por ocurrencia de una sequía en la región, conduciría a un sufrimiento de más de veinte millones de habitantes.

Así, para el análisis respectivo, el insumo principal son los datos de precipitación mensual obtenidos de la base de datos Daymet de la Agencia Espacial Estadounidense (NASA: https://daymet.ornl.gov/). La Figura 5 muestra la serie de precipitación de la cuenca de Valle de Bravo. Se aprecia también una reducción notoria en la precipitación pluvial en los últimos cinco años. Por tanto, se aplica la prueba estadística de Dickey-Fuller a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ para verificar si la serie es estacionaria o no. Los resultados revelaron que, en efecto, la serie de tiempo es no estacionaria; es decir, presenta cambios significativos en la media y la varianza de los datos a lo largo del tiempo. Esto último, es probable que sea reflejo de las alteraciones climáticas atribuibles a efectos del cambio climático.

Con lo anterior, procede a realizar la diferencia de orden 1 entre los datos de la serie de precipitación pluvial para convertir la serie en estacionaria. Esta diferencia se realiza a través de la Ecuación 12 con los datos en un instante cualquiera (x_t) y el dato inmediato anterior ($xt\text{-}1$). El cuadro 2 muestra un ejemplo de diez datos de este procedimiento.

Figura 5. Precipitación mensual



Fuente: base de datos Daymet de la Agencia Espacial Estadounidense (NASA: https://daymet.ornl.gov/).

Cuadro 2. Ejemplo de diferenciación temporal de orden 1 entra una serie de datos (x_t) y el dato anterior (x_t-1)

Datos originales (x_t)	Datos en x_{t-1}	Diferencia de orden 1
40	---	---
15	40	-25
20	15	5
5	20	-15
30	5	25
65	30	35
180	65	115
210	180	30
163	210	-47
50	163	-113

Fuente: elaboración propia.

Con la serie estacionaria, se procedió a realizar diferentes estacionales de 12 períodos. Lo anterior puede ser comprobado mediante un Análisis Rápido de Fourier. Sin embargo, los datos mensuales de variables hidrológicas, los valores máximos y mínimos tienen una periodicidad en su ocurrencia de 12 meses. El procedimiento de diferenciación estacional es homólogo al de diferenciación temporal donde al dato en un instante cualquiera (x_t) se le resta el dato doce períodos antes de su registro (x_t-*12*). De esta forma se asegura que la remoción de ciclos estacionales en la serie de tiempo ha sido efectuada.

Posteriormente, se realizó la calibración de diferentes modelos SARIMA haciendo variar el número de términos de autorregresión (AR) y de medias móviles (MA) tanto ordinales como estacionales. Para la selección del mejor modelo, se estimó el estadístico de Criterio de Información de Akaike (AIC, por sus siglas en inglés) y se eligió el modelo con el menor AIC reporte. De esta forma se obtuvo un mejor desempeño en el modelo SARIMA (0,1,0) (1,12,1), es decir, un modelo con 0 términos autorregresivos AR, diferencias estacionales de primer orden, 0 términos de medias móviles MA, 1 término de autorregresión estacional SAR, diferencias estacionales de orden 12 y 1 término de medias móviles estacionales SMA (Figura 5b).

Por definición, los modelos estocásticos consideran los residuales de los procesos de autorregresión (ε_t) por lo que para el pronóstico sólo se introduce con estos residuales en el modelo SARIMA y se estima el período deseado. Cabe señalar que el pronóstico será confiable en el corto plazo. Sin embargo, cuando la estimación se aleja del período (datos observados) su incertidumbre incrementará (Figura 5c). Por tanto, el uso de técnicas de pronóstico a corto plazo deben retroalimentarse en el tiempo para mejorar la estimación en períodos a mediano y largo plazo.

Finalmente, se estimó el Índice estandarizado de precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) con los datos de precipitación pronosticada (Figura 5d). Los resultados muestran en 2022 la cuenca de Valle de Bravo pasó por un período de sequía extrema que se extiende en toda la estación de lluvias. Estos resultados son alarmantes ya que el modelo refleja una reducción en el insumo principal de la gestión en los recursos hídricos: la precipitación. Esta reducción tiene efectos en todos los componentes del ciclo hidrológico, impactando directamente a los caudales mensuales escurridos y consecuentemente a los niveles de almacenamiento en los vasos de las presas del Sistema Cutzamala. Al verse comprometida el agua para uso urbano, es posible que se generen condiciones de estrés hídrico en los ecosistemas aledaños.

Conclusiones

El pronóstico de la sequía meteorológica depende directamente del pronóstico de las variables básicas que explican el fenómeno. El tratamiento de las series de tiempo históricas es un factor clave en la calibración confiable de cualquier modelo estocástico. Los modelos SARIMA permiten generar una variedad de posibles modelos para fin de pronóstico. Un tratamiento adecuado de los datos facilita la selección de los parámetros de cualquier modelo SARIMA, ya que filtra la señal observada mejorando los resultados de las funciones de autocorrelación y autocorrelación parcial. Sin embargo, aún con la serie filtrada podría dificultarse la selección de los parámetros.

Lo anterior propicia una amplia gama de posibles modelos a ser seleccionados con fines de pronóstico. La literatura especializada recomienda la sección del modelo con la valoración mínima del AIC o BIC, el ejemplo presentado refleja que puede traer consecuencias en el pronóstico a corto y largo plazo. Por tanto, se recomienda a los analistas realizar la calibración de varios modelos y balancear entre simplicidad del modelo (a través de la minimización del AIC o BIC) con el ajuste de éste (índice NASH o cualquier índice de error).

Bibliografía

Alfonso, C. (2006). Encuentros internacionales sobre gestión del agua, Mediterráneo, agua y sequías. *Revista ambienta* (marzo 2006), pp. 6-13. España.

Arrojo A., P. (2008). Prevenir las sequías desde la planificación en perspectivas de cambio climático. *Revista ambienta* Junio de 2008, pp. 34-40. España.

Bâ K. M., Díaz C., Llamas J. y Llanos H. (1995). Zonas semiáridas y su modelación hidrológica (lluvia-escurrimiento). *Ingeniería Hidráulica en México*, vol. X, Núm. 2 mayo-agosto 1995, pp. 21-31.

Birkel D, Ch. (2006). Sequía hidrológica en Costa Rica ¿Se han vuelto más severas

y frecuentes en los últimos años?. *Revista Reflexiones* No. 85 (1-2), pp. 107-116.

Bordi, I. y Sutera, A. (2002). An analysis of drought in Italy in the last fifty years. Società Italiana di Fisica. I*l nuovo cimento*, vol. 25 C.N.2. Marzo-Aprile 2002, pp. 185-206. Italia.

Box, G.E.P. y Jenkins, G.M. (1976). *Time Series Analysis: Forecasting and Control.* Holden-Day, San Francisco, 575 pp.

Bravo L., A. G., Salinas G., H. y Rumayor R., A. (2006). Sequía: vulnerabilidad, impacto y tecnología para afrontarla en el Norte Centro de México. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias INIFAP*. Libro Técnico* Num. 4. 2a. Ed. 310 p.

Brockwell, P.J. y Davis, R.A. (1991). *Time Series: Theory and Methods*. 2a. Edición, Springer Series in Statistics, Springer, New York.

Cebrián G., A. C. (1999). *Análisis, modelización y predicción de episodios de sequía.* Tesis doctoral del Departamento de métodos estadísticos 203p. Universidad de Zaragoza. España.

CONAGUA (2011). *Comisión Nacional del Agua*. http://www.conagua.gob.mx/SalaPrensa.aspx?id=925|NotaP|.

CONAGUA (2012). *Comisión Nacional del Agua - Servicio Meteorológico Nacional. Información de estaciones climatológicas normales en México.* http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Itemid=75.

Crespo P., G. (2006). *Comparación de dos metodologías para el cálculo del índice de severidad de sequía para doce reservas de la biósfera mexicana. Reporte de Investigación del Colegio de Posgraduados*. Colegio de Posgraduados 133p.

Dickey, D. A., y W. A. Fuller. (1979). Distribution of the Estimators for Autoregressive Time Series with a Unit Root. *Journal of the American Statistical Association*. 74, pp. 427–431.

Elder, J., y P. E. Kennedy. (2001). Testing for Unit Roots: What Should Students Be Taught? *Journal of Economic Education*. 32. 137–146.

Escalante S., C. y Reyes Ch., L. (2005). *Análisis de sequías. Volumen I y Volumen II.* 1110p. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Eslamian, Saeid; Ostad-Ali-Askari, Kaveh; Singh, Vijay P.; Dalezios, Nicolas R.; Ghane, Mohsen; Yihdego, Yohannes; Matouq, Mohammed. (2017). A review of drought indices. *International Journal of Constructive Research in Civil Engineering (IJCRCE). 3*(4). pp. 48-66.

Fernández, L. B. (1997). Identificación y caracterización de sequías hidrológicas en Chile Central. *Ingeniería del Agua, 4*(4), 37-46.

Fernández R., A. O., González, Y. A. y Faife, F. N. (2009). Análisis espacio-temporal de sequías meteorológicas en la cuenca hidrográfica Guantánamo-Guaso, mediante el índice de precipitación estandarizada. *Voluntad Hidráulica*, pp. 22-29.

González P., J. (2005). C*aracterización estocástica de la realización espacio-temporal de eventos hidrológicos extremos de sequías*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 213p. España.

González P., J. y Valdés, J. B. (2006). New drought frequency index: definition and comparative performance analysis. *Water resources research*, vol. 42 November 2006. pp.1-13.

Hallack-Alegria, M. y Watkins, D. Jr. (2006). Annual and warm season drought intensity-duration-frequency: Analysis of Sonora, México. *Journal of climate*, pp.1-44.

Hamilton, James D. (1994). *Time Series Analysis. Princeton*. Princeton University Press.

IPCC (2008). Cambio climático (2007). *Informe de síntesis*. (Pachauri, R. K. y Reisinger, A. –editores-). 1a. impression, 114 p.

Jenkins, G.M. y Watts, D.G. (1968). *Spectral Analysis and Its Applications*. Holden-Day, Oakland, CA, 525 pp.

Machiwal, D. y Kumar Jha, M. (2012). *Hydrologic Time Series Analysis: Theory and Practice*. 1a. Edición. 316 p.

Matalas, N.C. (1967). Time series analysis. *Water Resources Research, 3*(3). 817-829.

Moneo L., M. (2008). *Drought and climate change impacts on water resources: management alternatives*. Tesis doctoral. Departamento de economía y ciencias sociales agrarias 373 p. Universidad Politécnica de Madrid.

Montgomery, D.C., Johnson, L.A. and Gardiner, J.S. (1990). *Forecasting and Time Series Analysis, 2nd edition*. McGraw-Hill, New York.

OMM (1983). *Guía de prácticas climatológicas*. Organización Meteorológica Mundial -OMM - NI 100, segunda edición 1983.

Paredes, F., Millano, J. L. y Guevara, E. (2008). Análisis espacial de las sequías meteorológicas en la región de los Lanos de Venezuela durante el período 1961-1996. *Revista de Climatología*, vol. 8 Julio de 2008, pp. 15-27.

Pereira, L. S. y Paulo, A. A. (2006). *Droughts: concepts, indices and prediction*. Centro de investigación de ingeniería agrícola, 20p. Instituto de agronomía. Universidad técnica de Lisboa.

PNUD (2004). *La reducción de riesgos de desastres: un desafío para el desarrollo.* Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD). 157 p.

Rossi, G., Cancelliere, A. y Giuliano, G. (2005). Case study: multicriteria assessment of drought mitigation measures. *Journal of water resources planning and management.* ASCE November-December 2005, pp. 449-457.

SMN Servicio Meteorológico Nacional (2012). *Normales climatológicas por estación.* http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=42&Item

id=75

SMN Servicio Meteorológico Nacional (2014). *Monitor de Sequía de América del Norte*. NADM. http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=236&Itemid=74

Shahin, M., Van Oorschot, H.J.L. y De Lange, S.J. (1993). *Statistical Analysis in Water Resources Engineering.* A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands, 394 p.

Schlittgen, J. y Streitberg, B.H.J. (2001). *Zeitreihenanalyse*. Oldenbourg, Munich, Alemania.

Tsakiris, G., Loukas, A., Pangalou, D., Vangelis, H. y Tigkas, D. (2007). Chapter 7. Drought characterization. *Options mediterranéennes. Series B.* No. 58, pp. 85-102.

Valiente, O M. (2001). Sequía: definiciones, tipologías y métodos de cuantificación. I*nvestigaciones Geográficas.* No. 26 (2001), pp. 59-80. España.

Vilchis-Francés, A.Y., Díaz-Delgado, C., Magaña-Lona, D., Bâ, K.M., Gómez-albores, M.A. (2015). Modelado espacial para peligro de incendios forestales con predicción diaria en la cuenca del río Balsas. *Agrociencia* 49: pp. 803-820.

Yevjevich, V. M. (1972). Probability and Statistics in Hydrology. *Water Resources Publications*. Fort Collins, Colorado, U.S.A. pp. 126-133.

Yihdego, Yohannes; Vaheddoost, Babak; Al-Weshah, Radwan A. (2019). Drought indices and indicators revisited. *Arabian Journal of Geosciences*. pp. 12-69.

Capítulo 12. Estimación de la alteración hidrológica en ríos con aforo hidrométrico

Carlos Díaz Delgado [1]
Ricardo Arévalo Mejía [2]
Carlos Alberto Mastachi Loza [3]
Humberto Salinas Tapia [4]

Introducción

El estudio de caudal ecológico requiere establecer una línea base de las condiciones hidrológicas en los ríos a estudiar, así como los resultados deseados en un cierto tiempo (Poff *et al.*, 2017). Esto permite evaluar si las características del régimen en el río han sido modificadas. Además, sienta las bases para trazar algún plan estratégico de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) para la recuperación y/o rehabilitación de los cuerpos de agua (Speed *et al.*, 2011). Una alteración favorable o desfavorable queda sujeta a las necesidades del ecosistema, al crecimiento económico, a las demandas de la sociedad, entre otros (Carlisle *et al.*, 2011; Arthington, 2012; O'Brien *et al.*, 2018).

Sin embargo, el término "alteración hidrológica" (AH) comúnmente engloba modificaciones en el régimen del flujo en los ríos (Mackay *et al.*, 2014); alteraciones en el régimen de sedimentos (Wohl *et al.*, 2015); cambio climático que afecta directamente a la temperatura del agua de los ríos y su evapora-

1 Maestro en Ciencias del Ambiente. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

2 Doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

3 Doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

4 Doctor en Ciencias Técnicas. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

ción (Maheu, Poff y St-Hilaire, 2016; Paredes-Tavares *et al.*, 2018); variaciones en parámetros fisicoquímicos (Lawrence *et al.*, 2014); degradación de la calidad química (Moss, 2010); entre otros aspectos. Sin embargo, en el marco del presente trabajo, se limita el término "alteración hidrológica" al análisis de componentes del régimen hidrológico de caudales.

El análisis de AH requisita parámetros ambientalmente significativos para evaluar el estado del caudal de un río. Aspectos del régimen que están fuertemente ligados con los componentes, procesos, estacionalidad y dinámica del ecosistema seleccionado (Martínez y Fernández, 2021). Es esencial que dicha selección permita analizar el estado hidrológico bajo diferentes condiciones temporales (e.g: años secos, medios y húmedos), o bien, por tipo de río (e.g: perenne o intermitente) (Poff *et al.*, 2010; O'Brien *et al.*, 2018).

Los orígenes de los parámetros estadísticos de AH fueron propuestos por Richter *et al.* (1997) en 67 parámetros relacionados con el régimen de caudales teniendo buena aceptación por la comunidad científica debido al significado ecológico que suponían. Sin embargo, diversos estudios han demostrado la correlación existente entre algunos de los indicadores presentados (Olden y Poff, 2003; St-Hilaire *et al.*, 2009). Por tal razón, se ha reducido el número de parámetros a los mínimos necesarios para un correcto analísis.

Martínez y Fernández (2021) representan un ejemplo de la labor de resumen donde integraron indicadores para evaluar tres aspectos fundamentales del régimen de caudales: i) magnitud y variabilidad de flujos anuales; ii) variabilidad y estacionalidad de los flujos mensuales y iii) variabilidad de los valores de flujos extremos. En 2007 The Nature Conservation expuso una herramienta digital para la estimación de indicadores de AH que incluyen la estimación de pulsos altos y bajos (Matthews y Richter, 2007). Posteriormente, se realizaron propuestas para analizar las tasas de incremento y decremento del régimen (Auerbach *et al.*, 2012). En México, la norma mexicana NMX-AA-159-SCFI-2012 presenta un método de referencia para la evaluación de alteración en cursos de agua con base en los percentiles de contribución de flujos mensuales y anuales de las series de datos disponibles en estaciones de aforo hidrométrico (DOF, 2012).

Actualmente, existe un fuerte debate sobre qué parámetros explican mejor la dinámica hídrica de los cauces, así como sus efectos en las comunidades biológicas presentes y sus impactos en las actividades humanas. Sin embargo, con frecuencia se reconoce al régimen hidrológico natural (RHN) como un estado de referencia cuyas características se desean conservar. El período de registro de caudales más reciente se supone como régimen hidrológico alterado (RHA) (Auerbach *et al.*, 2012; Poff *et al.*, 2017).

1. Paradigma de diseño

Los estudios de alteración hidrológica parten del paradigma del régimen natural de caudales (Poff *et al*., 1997), el cual establece al RHN como condiciones de referencia y evalúa el RHA. Lo anterior se cumple en ríos cuyo régimen no se ha modificado y se prioriza la conservación de las condiciones naturales; también se cumple en ríos moderadamente alterados donde la rehabilitación es viable con inversiones relativamente reducidas (Acreman *et al*., 2014).

Existen ríos en todo el mundo cuyos regímenes y/o calidad han sido alterados por un período de tiempo prolongado. Por ejemplo, el *Mobile River* (EUA) ha declarado extintas 16 especies nativas de moluscos como producto de la alteración del régimen (Naiman *et al*., 2002). El río Tamesis en Inglaterra, muestra alteraciones desde la década de 1960 (Acreman *et al*., 2014). En México, el curso alto del río Lerma ha sido alterado a niveles alarmantes con contenido de óxigeno disuelto inferior a 0.5 mg/L (Fall *et al*., 2007). En África, las políticas de regulación de la presa Manantali han incrementado los caudales mínimos del río Senegal, favoreciendo el comercio fluvial y la disponibilidad de agua en época de estiaje (Bâ, 2016).

En casos donde la magnitud del RHA es superior al RHN, o bien, donde el RHA ha permanecido inferior al RHN por un período prolongado, el paradigma del régimen natural de caudales no es aplicable (Arthington, 2012). La modificación de los nichos ecológicos pueden ser irreversibles (e.g: río Lerma), ya sea por beneficios económicos en la región, por políticas de regulación del caudal o por cambios naturales. El caudal ecológico queda entonces en función del diseño del régimen por simulación y restringido a respuestas hábitat-caudal-sociedad (O'Brien *et al*., 2018). El régimen final y sus implicaciones ecónomicas, sociales y ambientales quedan a juicio y aceptación de los intereses y capacidad de inversión de los stakeholders de cada región (Acreman *et al*., 2014).

2. Métodos para cuantificar la alteración hidrológica

La presente sección retoma dos métodos para efectuar el análisis de alteración hidrológica en las cuencas hidrológicas de la república mexicana. Los aspectos metodológicos son presentados de forma sucinta en las siguientes secciones.

2.1 IAH de la NMX-AA-159-SCFI-2012

Este método determina el régimen hidrológico en escalas mensual y anual para el estado natural y el más reciente. Su objetivo es identificar si existe, o no, alteración hidrológica a causa de la presencia de infraestructura hidráulica. Su aplicación se extiende a todos los afluentes donde se identifique el grado de afectación del RHA sobre el RHN. Su uso requiere información dia-

ria mayor a 20 años de registro para cada condición hidrológica (natural y presente o posiblemente modificada). Si se cuenta con períodos de registro menores a 20 años, se deberá analizar la representatividad de la serie en años húmedos, medios, secos y muy secos.

El procedimiento por seguir es el siguiente:

1. Identificar las corrientes en estudio para análisis de caudales ecológicos y establecer las aportaciones por tributarios y puntos de extracción de caudales.
2. Iniciando por la estación de aforo más representativa de la región bajo análisis, identificar el régimen de flujos ordinarios (máximos y mínimos) con base en:
    a. Clasificar la información hidrométrica diaria, es decir, los flujos medios mensuales de la serie en RHN y RHA.
    b. Organizar los caudales mensuales en años naturales para ambas series.
    c. Calcular con la información del RHN y, para cada mes del año, los percentiles 90 y 10 de la escala temporal mensual y anual.
3. Comprobar si para el RHA en escalas mensual y anual; se encuentra inserto en el régimen de caudal ordinario máximo (90 percentil, P90) y mínimo (10 percentil, P10) obtenidos por el RHN, donde:
    a. Si el RHA es ≥ 50% en magnitud mensual y anual con relación al RHN, se asumirá como régimen hidrológicamente no alterado.
    b. Si el RHA es < 50% en su magnitud mensual y anual con relación al RHN, se ratificará como régimen hidrológicamente alterado.

2.2 IAH de IAHRIS

El software de Índices de Alteración Hidrológica en Ríos (IAHRIS) fue patrocinado por la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente de España y desarrollado por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas y la Universidad Politécnica de Madrid (Martínez y Fernández, 2021). La versión más actualizada presenta un número de veintiún IAHs divididos en tres grupos: valores habituales, valores extremos máximos y valores extremos mínimos que resumen aquellos presentados por Richter *et al.* (1997). Incluyen consideraciones adicionales al RHN realizadas por Poff *et al.* (1997) y permiten obtener:

a. Parámetros para caracterización del régimen hidrológico de un curso de agua.
b. Índices de valoración del grado de alteración del régimen hidrológico.
c. Criterios para establecer la condición de masa de agua muy alterada.

d. Escenarios de regímenes ambientales de flujos hídricos que el interesado puede generar con base en los patrones del régimen natural.

Al respecto, los expertos científicos coinciden en la selección de índices para establecer características de caudales sobre la magnitud, frecuencia, estacionalidad, duración y tasas de cambio del régimen natural bajo las siguientes consideraciones:

- Magnitud: delimita la disponibilidad total de agua en el ecosistema.
- Frecuencia con la que un evento ocurre en un intervalo de tiempo dado: indicador de la variabilidad del régimen de caudales y causante de la dinámica geomorfológica, ecológica y de la biodiversidad.
- Duración o intervalo de tiempo asociado con condiciones específicas de flujo: en situaciones de avenidas y sequías, la duración está fuertemente ligada con los umbrales de resiliencia de las diferentes especies.
- Estacionalidad: corresponde con la regularidad con la que un evento ocurre en una época determinada del año. Este es un aspecto vinculado, y en sincronía, con los ciclos de vida de las especies (fluviales, de estuarios y marinas).
- Tasas de cambio: este aspecto se refiere a la velocidad con la que se producen los cambios de unas magnitudes a otras, afectando la capacidad de respuesta de la biota.

El método considera una representatividad de años secos, medios y húmedos del 25%, 50% y 25% respectivamente y se divide el registro de datos como sigue:

a. Un año se asumirá como húmedo si su contribución en régimen natural es mayor a la aportación correspondiente con el percentil de excedencia del 25%.
b. Un año será clasificado como promedio si su aportación anual en régimen natural se encuentra en el intervalo definido por las aportaciones correspondientes con los percentiles de excedencia del 25% y 75%.
c. Un año será asumido como seco si su aportación anual en régimen natural es menor a la aportación correspondiente con el percentil de excedencia del 75%.

El percentil excedentario no proviene de un análisis de modelación probabilística de caudales, sino de la repetición del número de observaciones y la probabilidad de exceder su frecuencia acumulada. Se emplea la fórmula de probabilidad empírica de Weibull para tal efecto.

$$P = \frac{m}{n+1} \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde: P es la probabilidad empírica asignada para cada observación; m es la ubicación que ocupa el valor de cada observación en la serie ordenada en forma creciente; n es el total de datos disponibles.

Los índices parciales de condiciones naturales y alteradas (para los primeros seis índices) están dados según:

$$IAH_{(RHN,RHA)} = 0.25\left(IAH_i^{Seco}\right) + 0.50\left(IAH_i^{Medio}\right) + 0.25\left(IAH_i^{Húmedo}\right) \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde: $I_{(RHN,RHA)}$ es el índice parcial para el RHN y el RHA, $\left(IAH_i^{Seco}\right)$ es el valor del índice i para años secos, $\left(IAH_i^{Medio}\right)$ es el valor del índice i para años medios e $\left(IAH_i^{Húmedo}\right)$ es el valor del índice i para años húmedos.

Cada índice es conformado como el cociente del índice del RHA entre el índice del RHN:

$$IAH_i = \frac{IAH_{RHA}}{IAH_{RHN}} \qquad \text{Ecuación 3}$$

Donde: IAH_i es el índice parcial marcado en IAH_{RHA} es el índice para el *RHA e* IAH_{RHN} es el índice para el RHN.

Finalmente se tienen tres índices de alteración global (IAG). Uno para los valores habituales, otro para valores extremos máximos y el último para los valores extremos mínimos. Cada uno de los IAG está dado por:

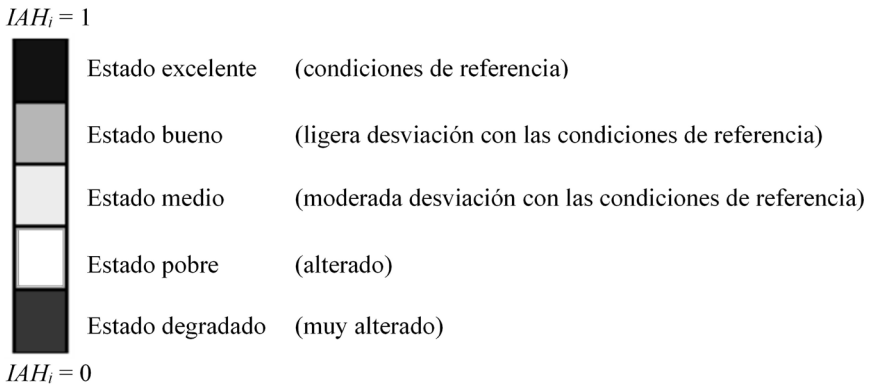
$$IAG_i = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n} a_i\right)^2 - \sum_{i=1}^{n} a_i^{\,2}}{n(n-1)} \qquad \text{Ecuación 4}$$

Donde: IAG_i es el índice de alteración global *i*, *n* es el número de índices de alteración que evalúan un aspecto del régimen y *ai*=valor que toma el índice $IAH_{iparcial}$.

Para valorar cuantitativa y cualitativamente el grado de alteración, se proponen cinco estados de alteración hidrológica, denominados "estatus hidrológicos" (Figura 1). Dicha clasificación está basada en las recomendaciones de niveles y asignación de colores recogida en CIS-WFD (2003). Cada índice está acotado entre 0 y 1, correspondiendo a 1 la condición óptima (mínima alteración) y a 0 la más desfavorable (máxima alteración).

Asumiendo una atribución equitativa a cada clase propuesta, el cuadro 1 muestra los criterios de representación y asignación de los estatus hidrológicos derivados de los índices parciales mediante una ecuación cuadrática.

Figura 1 clasificación de estatus hidrológicos



Fuente: adaptada de CIS-WFD (2003).

Cuadro 1. Clasificación de los estatus hidrológicos para los índices parciales (IAHi)

Estatus hidrológico de índices parciales (IAH_i)				
Nivel I	**Nivel II**	**Nivel III**	**Nivel IV**	**Nivel V**
$0.8 < IAH_i \leq 1$	$0.6 < IAH_i \leq 0.8$	$0.4 < IAH_i \leq 0.6$	$0.2 < IAH_i \leq 0.4$	$0 \leq IAH_i \leq 0.2$

Fuente: Martínez y Fernández (2018).

Con respecto a los índices de alteración global, y con fundamento en la relación cuadrática existente de IAH con IAG (Ecuación 4), se obtienen los siguientes criterios de representación y asignación del estatus hidrológico para los índices globales (Cuadro 2).

Cuadro 2. Clasificación de los estatus hidrológicos para los índices globales (IAGi)

Estatus hidrológico de índices globales (IAG_i)				
Nivel I	**Nivel II**	**Nivel III**	**Nivel IV**	**Nivel V**
$0.64 < IAG_i \leq 1$	$0.36 < IAG_i \leq 0.64$	$0.16 < IAG_i \leq 0.36$	$0.04 < IAG_i \leq 0.16$	$0 \leq IAG_i \leq 0.04$

Fuente: Martínez y Fernández (2018).

Dado que no existe una ponderación entre los tres índices globales para obtener un sólo valor de alteración, se considera como régimen no alterado si los tres IAGi son mayores que 0.36. De contar por lo menos con un índice global por debajo de 0.36, se considera el régimen en estado de alteración.

La alteración hidrológica también se presenta cuando la valoración del RHA es superior a la del RHN. En dichos casos, se acepta que las magnitudes del RHA sean superiores a la del RHN siempre y cuando no sean significativas para los ecosistemas dependientes. De esta forma, la estimación de los índices parciales está dada por el inverso de la Ecuación 3.

2.2.1 Índices de alteración de valores habituales

IAH1: Índice de magnitud de aportaciones anuales

Evalúa el nivel de diferencia causada por el régimen circulante en la magnitud de las aportaciones anuales de acuerdo con su valor respectivo en régimen natural. El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final, está dado por la ponderación de la Ecuación 2.

$$IAH1^{z} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left[\frac{(AA_{añoi})_{RHA}}{(AA_{añoi})_{RHN}}\right]^{z} \qquad \text{Ecuación 5}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo z, $(AA_{añoi})_{RHA}$ es la portación anual en régimen alterado, $(AA_{añoi})_{RHN}$es la aportación anual en régimen natural y z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

IAH2: Índice de magnitud de aportaciones mensuales

Para evitar las posibles compensaciones entre los meses del año, cuando se procesa información de valores anuales, se sugiere el uso de este índice que pondera uniformemente la alteración de cada mes. El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final está dado por la ponderación de la Ecuación 2.

$$IAH2^{z} = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}\left[\frac{1}{12}\sum_{i=1}^{12}\frac{(Am_{mesi,añoj})_{RHA}}{(Am_{mesi,añoj})_{RHN}}\right]^{z} \qquad \text{Ecuación 6}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo z, $(Am_{mesi,añoj})_{RHA}$ es la aportación mensual correspondiente al mes i del año j en régimen alterado, $(Am_{mesi,añoj})_{RHN}$ es la aportación mensual correspondiente al mes i del año j en régimen natural y z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

IAH3: Índice de variabilidad habitual

Valúa la discrepancia que ocurre en variabilidad habitual en un régimen alterado contrastado con el natural, donde se entiende que no tiene en consideración a los valores extremos que ocurren en el año. El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final está dado por la ponderación de la Ecuación 2.

$$IAH3^{z} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\frac{(Q_{10}-Q_{90})_{añoi,RHA}}{(Q_{10}-Q_{90})_{añoi,RHN}} \qquad \text{Ecuación 7}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo z, Q_{10} es el caudal con probabilidad de excedencia del 10% en la curva de duración de caudales del tipo z, Q_{90} es el caudal con probabilidad de excedencia del 90% en la curva de duración de caudales del tipo z, los subíndices RHA y RHN hacen referencia al régimen hidrológico alterado y natural respectivamente y z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

IAH4: Índice de variabilidad extrema

Evalúa la diferencia causada por el régimen circulante con respecto a la variabilidad extrema de los valores habituales bajo un régimen natural. El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final está dado por la ponderación de la Ecuación 2.

$$IAH4^{z} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left[\frac{(Am\ máxima - Am\ mínima)_{añoi,RHA}}{(Am\ máxima - Am\ mínima)_{añoi,RHN}}\right]^{z} = \frac{1}{k}\sum_{i=1}^{k}\left[\frac{A}{B}\right]^{z} \qquad \text{Ecuación 8}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo z, $(Am\ máxima - Am\ mínima)_{añoi,RHA}$es la aportación mensual máxima del año i en régimen alterado (análogamente para *Am* mínima *año i, RHA*), $(Am\ máxima - Am\ mínima)_{añoi,RHN}$ es la aportación mensual máxima del año i en régimen natural (análogamente para *Am* mínima, *año i, RHN*) y z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

IAH5: Índice de estacionalidad de máximos

Evalúa la distorsión generada por el régimen circulante con respecto a la estacionalidad de las aportaciones máximas mensuales bajo un régimen natural. El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final está dado por la ponderación de la Ecuación 2.

$$IAH5^z = 1 - \frac{1}{6}\left[\frac{1}{k}\sum_{i=|}^{k}\left(número\ de\ meses\ de\ desfase\ del\ máximo\right)_{añoi}\right]^z \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo z , *(número de meses de desfase del máximo)*$_{añoi}$ es el número de meses de desfase entre el mes de máxima aportación en régimen alterado y el mes de máxima aportación en régimen natural para un año dado y z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

IAH6: Índice de estacionalidad de mínimos

Evalúa la distorsión generada por el régimen circulante con respecto a la estacionalidad de las aportaciones mínimas mensuales bajo un régimen natural. El índice se determina para las condiciones secas, medias y húmedas. El valor final está dado por la ponderación de la ecuación.

$$IAH6^z = 1 - \frac{1}{6}\left[\frac{1}{k}\sum_{i=|}^{k}\left(número\ de\ meses\ de\ desfase\ del\ mínimo\right)_{añoi}\right]^z \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde: k es el número de años perteneciente al tipo ***Z*** *(número de meses de desfase del mínimo)*$_{añoi}$ es el número de meses de desfase entre el mes de mínima aportación en régimen alterado y el mes de mínima aportación en régimen natural para un año dado y z es el tipo de año (seco, medio o húmedo).

2.2.2 Índices de alteración de valores extremos máximos

IAH7: Índice de magnitud de avenidas máximas

Valora la alteración sobre la magnitud de las avenidas máximas considerando como parámetro el valor de la esperanza matemática de la serie de flujos máximos diarios promedio para los RHN y RHA.

$$IAH7 = \frac{(\overline{Qc})_{RHA}}{(\overline{Qc})_{RHN}} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde: $(\overline{Q}c)_{RHA}$ es la esperanza matemática de los flujos máximos flujos promedio diario anual de la serie disponible del régimen alterado, $(\overline{Q}c)_{RHN}$ es la esperanza matemática de los flujos máximos diarios promedio anuales de la serie disponible del régimen natural.

IAH8: Índice de magnitud del caudal generador del lecho

El flujo generador del hecho representa la magnitud y frecuencia de aquellos caudales máximos con mayor implicación geomorfológica. Al respecto, Hickey y Salas (1995) analizaron las alteraciones en fauna, vegetación, bentos y geomorfología derivadas de cambios en el régimen de avenidas. De todas es-

tas implicaciones ambientales, el significado geomorfológico de los caudales máximos resultó ser la más tangible. De esta forma, el caudal generador del lecho está dado por la Ecuación 12 mientras que el IAH8 queda dado por la Ecuación 13.

$$Q_{MCO} = \left(\overline{Qc}\right) * \left[0.7 + 0.6 * CV\left(Qc\right)\right] \cong Q_{GL} \qquad \text{Ecuación 12}$$

Donde: Q_{MCO}es el caudal correspondiente a la máxima crecida ordinaria, Q_{GL} es el caudal generador del lecho, $\overline{Q}c$es la media de la serie de máximos caudales medios diarios anuales y $CV(Qc)$es el coeficiente de variación de la serie de máximos caudales medios diarios anuales.

$$IAH\,8 = \left(\frac{Q_{GLRHA}}{Q_{GLRHN}}\right)^{0.5} \qquad \text{Ecuación 13}$$

Donde: Q_{GLRHA}es el caudal generador del lecho correspondiente al régimen alterado y Q_{GLRHN} Caudal Generador del Lecho correspondiente al régimen natural.

IAH9: Índice de magnitud de caudal de conectividad

El caudal de conectividad (Q_CONEC) es empleado para representar a los caudales máximos que aseguran el vínculo cauce-llanura de inundación, particularmente asociados con la dinámica de la franja riparia y los ecosistemas dependientes de inundaciones regulares. El índice, pretende evaluar la magnitud de aquellos flujos relacionados con el mantenimiento del vínculo transversal cauce–llanura de inundación. Dicha conectividad asegura la accesibilidad y procuración de los requerimientos de humedad necesarios para todos los estadíos de la biota. Igualmente, favorece el rejuvenecimiento del hábitat ripario, los procesos de sucesión del bosque de ribera y garantiza el mantenimiento de la secuencia en tramos meandriformes, el rejuvenecimiento de los canales laterales, entre otros aspectos (Poff *et al.*, 1997; Richter *et al.*, 2006). Cabe resaltar, que la conectividad transversal se constituye como una variable crítica en la sostenibilidad de la diversidad y funcionalidad de las poblaciones de macroinvertebrados (Durance y Ormerod, 2007).

Por lo tanto, el Q_CONEC es un caudal mayor a QGL, y al cual le corresponde un período de retorno del doble de este último.

$$Q_{CONEC} = Q_{(T=2T_{QGL})} \qquad \text{Ecuación 14}$$

Donde: Q_{CONEC} es el caudal de conectividad y $Q_{(T=2T_{QGL})}$ es el caudal cuyo periodo de retorno es el doble del periodo de retorno del caudal generador del lecho. Para tal efecto, se sugiere emplear la distribución de probabilidad Gumbel Tipo I (Llamas, 1993).

$$IAH9 = \frac{T_{(Q_{CONEC})RHA}}{T_{(Q_{CONEC})RHN}}$$ Ecuación 15

Donde: Q_{CONEC} es el caudal de conectividad en régimen natural (caudal que duplica el período de retorno del caudal generador del lecho en dicho régimen), $T_{(Q_{CONEC})RHA}$ es el período de retorno correspondiente al caudal de conectividad en régimen alterado y $T_{(Q_{CONEC})RHN}$ es el período de retorno correspondiente al caudal de conectividad en régimen natural.

IAH10: Índice de magnitud de las avenidas habituales

Define a la avenida habitual como el caudal con probabilidad de excedencia del 5% (Q5%) de la curva de duración de caudales. Constituye una variable hidrológica adicional que resume múltiples aspectos de funcionalidad biológica de los valores máximos, ya que representa la ocurrencia de fenómenos con ciclos menores de un año.

$$IAH10 = \frac{Q_{5\%RHA}}{Q_{5\%RHN}}$$ Ecuación 16

Donde: $Q_{5\%RHA}$es la avenida habitual en régimen alterado y $Q_{5\%RHN}$es la avenida habitual en régimen natural.

IAH11: Índice de variabilidad de las avenidas máximas

Este índice corresponde al cociente de los coeficientes de variación de la información de flujos medios diarios máximos anuales de los RHA y RHN.

$$IAH11 = \frac{CV(Qc_{RHA})}{CV(Qc_{RHN})}$$ Ecuación 17

Donde: $CV(Qc_{RHA})$ es el coeficiente de variación de la serie de flujos medios diarios máximos anuales correspondiente al régimen alterado y $CV(Qc_{RHN})$ es el coeficiente de variación de la serie de flujos medios diarios máximos anuales correspondiente al régimen natural.

IAH12: Índice de variabilidad de las avenidas habituales

Cuantifica la alteración en la variabilidad interanual de las avenidas habituales. El índice emplea como estimador al cociente de los coeficientes de variación de la serie de valores Q5% de los regímenes alterado y natural.

$$IAH12 = \frac{CV(Q_{5\%RHA})}{CV(Q_{5\%RHN})}$$ Ecuación 18

Donde: $CV(Q_{5\%RHA})$es el coeficiente de variación de la serie de valores correspondientes a la avenida habitual en régimen alterado (serie anual de $Q_{5\%}$) y $CV(Q_{5\%RHN})$es el coeficiente de variación de la serie de valores correspondientes a la avenida habitual en régimen natural (serie anual de $Q_{5\%}$).

IAH13: Índice de duración de avenidas

Caracteriza la duración de las avenidas como el máximo número de días consecutivos que iguala o supera el umbral del Q5%.

$$IAH13 = \frac{\left(máximo\ número\ de\ días\ consecutivos\ con\ Q > Q_{5\%RHN}\right)_{RHA}}{\left(máximo\ número\ de\ días\ consecutivos\ con\ Q > Q_{5\%RHN}\right)_{RHN}} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde: *(máximo número de días consecutivos con* $Q>Q_{5\%RHN})_{RHA}$ es el máximo número de días consecutivos, en valor medio, en el régimen alterado, en que se iguala o supera la avenida habitual natural y *(máximo número de días consecutivos con* $Q>Q_{5\%RHN})_{RHN}$ es el máximo número de días consecutivos, en valor medio, en el régimen natural, en que se iguala o supera la avenida habitual natural.

IAH14: Índice de estacionalidad de avenidas

Se enfoca en valorar los cambios en la estacionalidad de las avenidas para cada mes del año y estimar ulteriormente el índice de alteración como la esperanza matemática de los índices mensuales.

$$IAH14^{mes\ i} = \begin{cases} 0 & Si\ |natural - alterado| > 5 \\ \dfrac{5 - |natural - alterado|}{5} & Si\ |natural - alterado| \le 5 \end{cases} \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde: $natural$ es el número medio de días al mes con $Q > Q_{5\%RHN}$ en régimen natural para el mes considerado y $alterado$ es el número medio de días al mes con $Q > Q_{5\%RHN}$ en régimen alterado para el mes considerado.

2.2.3 Índices de alteración de valores extremos mínimos.

IAH15: Índice de magnitud de las sequías extremas

Analiza los cambios en magnitud de las sequías con base en la posible relación entre el valor medio de las series de flujos diarios mínimos anuales correspondientes al RHA y al RHN.

$$IAH15 = \frac{\overline{Q}s_{RHA}}{\overline{Q}s_{RHN}} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde: $\overline{Q}s_{RHA}$ es la esperanza matemática de los flujos diarios mínimos anuales de la información disponible del RHA y $\overline{Q}s_{RHN}$ es la esperanza matemática de los flujos diarios mínimos anuales de la información disponible del RHN.

IAH16: Índice de magnitud de las sequías habituales

Evalúa los cambios en magnitud de las sequías (flujo con probabilidad de excedencia de 95% de la curva de duración de caudales). Evita emplear únicamente valores mínimos extremos dado que ocultan otras situaciones que, aún cuando menos críticas, son de gran implicación ambiental.

$$IAH16 = \frac{Q_{95\%RHA}}{Q_{95\%RHN}} \qquad \text{Ecuación 22}$$

Donde: $Q_{95\%RHA}$ es el flujo (m^3/s) correspondiente a la sequía habitual en RHA y $Q_{95\%RHN}$ es el flujo (m^3/s) correspondiente a la sequía habitual en RHN.

IAH17: Índice de variabilidad de las sequías extremas

Expresa la relación entre los coeficientes de variación de las series de flujos diarios mínimos anuales del RHA con respecto al RHN.

$$IAH17 = \frac{CV(Qs_{RHA})}{CV(Qs_{RHN})} \qquad \text{Ecuación 23}$$

Donde: $CV(Qs_{RHA})$ coeficiente de variación de la serie de flujos diarios mínimos anuales correspondiente del RHA y $CV(Qs_{RHN})$ coeficiente de variación de la serie de flujos diarios mínimos anuales correspondiente del RHN.

IAH18: Índice de variabilidad de las sequías habituales

El índice utiliza como estimador el cociente entre los coeficientes de variación de la serie de valores Q95% correspondiente al RHA con respecto al del RHN.

$$IAH18 = \frac{CV(Q_{95\%RHA})}{CV(Q_{95\%RHN})} \qquad \text{Ecuación 24}$$

Donde: $CV(Q_{95\%RHA})$ es el coeficiente de variación de la serie anual de valores correspondientes a la sequía habitual en régimen alterado (serie anual de $Q_{95\%}$) y $CV(Q_{95\%RHN})$ es el coeficiente de variación de la serie anual de valores correspondientes a la sequía habitual en régimen natural (serie anual de $Q_{95\%}$).

IAH19: Índice de duración de sequías

Este índice es número máximo de días consecutivos en que el flujo se encuentra por debajo del umbral determinado por el valor Q95%. En consecuencia, la alteración en la duración de sequías se estima como el cociente entre el valor de este parámetro en RHA y su homólogo en RHN.

$$IAH19 = \frac{\left(máximo\ número\ de\ días\ consecutivos\ con\ Q < Q_{95\%RHN}\right)_{RHA}}{\left(máximo\ número\ de\ días\ consecutivos\ con\ Q < Q_{95\%RHN}\right)_{RHN}} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde: *(máximo número de días consecutivos con* $Q<Q_{95\%RHN})_{RHA}$ es el número máximo de días consecutivos, en promedio, del RHA que no se supera el valor de la sequía habitual natural y *(número máximo de días consecutivos con* $Q<Q_{95\%RHN})_{RHN}$ es el número máximo de días consecutivos, en promedio, del RHN que se no se supera el valor de la sequía habitual natural.

IAH20: Índice de número de días con caudal no nulo

Evalúa el cambio en la duración de los períodos de caudal nulo para cada mes del año y ulteriormente estima el índice de alteración como el promedio de estos índices mensuales.

$$IAH20^{mes\ i} = \begin{cases} 0 & Si\ |natural - alterado| > 5 \\ \dfrac{5 - |natural - alterado|}{5} & Si\ |natural - alterado| \leq 5 \end{cases} \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde: $natural$ es el número promedio de días al mes con $Q = 0$ del RHN del mes considerado y $alterado$ número promedio de días al mes con $Q = 0$ del RHA del mes considerado.

IAH21: Índice de estacionalidad de sequías

Evalúa el cambio de la estacionalidad de las sequías para cada mes del año y posteriormente se estima el índice de alteración como el promedio de estos índices mensuales.

$$IAH21^{mes\ i} = \begin{cases} 0 & Si\ |natural - alterado| > 5 \\ \dfrac{5 - |natural - alterado|}{5} & Si\ |natural - alterado| \leq 5 \end{cases} \quad \text{Ecuación 27}$$

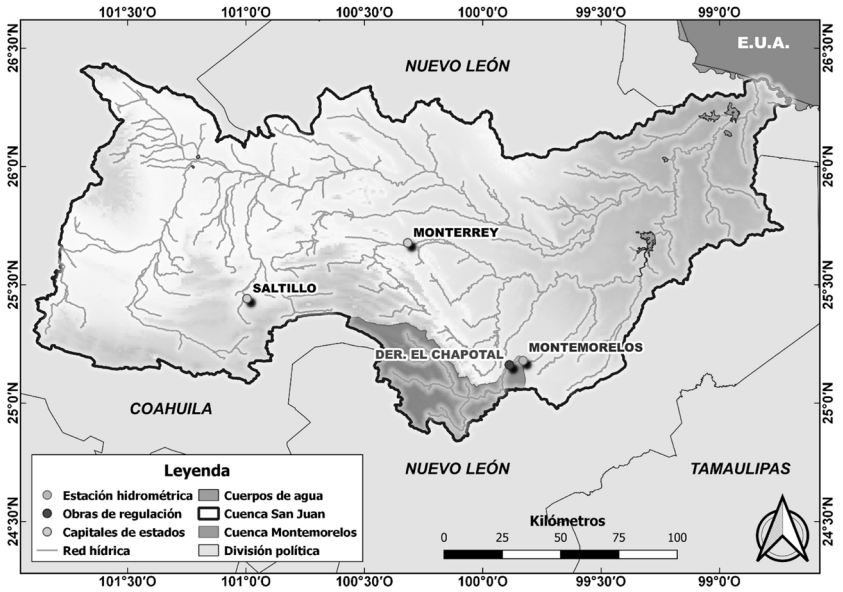
Donde: $natural$ es el número promedio de días al mes con $Q > Q_{95\%}$ del RHN del mes considerado y $alterado$ es el número promedio de días al mes con $Q < Q_{95\%}$ del RHA del mes considerado

3. Caso de estudio: determinación de la alteración hidrológica en la cuenca Montemorelos, Nuevo León, México.

3.1 Descripción del área de estudio

La estación hidrométrica de Montemorelos (-99.83 O, 25.18 N) se localiza en el centro del estado de Nuevo León (México) y al sureste de la ciudad de Monterrey. Aguas arriba de la estación, se encuentra la presa derivadora El Chapotal, misma que comenzó a regular el caudal escurrido a partir de 1956 (Figura 2). La zona en estudio está caracterizada por un clima semiárido, lo que favorece su clasificación como entre las regiones más calurosas del país para el período de junio a agosto. La precipitación es prácticamente inexistente en invierno, aunque generalmente ocurre de mayo a septiembre. La precipitación promedio anual de la región es estimada en 602 mm. La precipitación suele ocurrir en eventos cortos e intensos. La duración de lluvias prolongadas de baja intensidad (llovizna) usualmente es inferior a 1 ó 2 días. Los veranos son generalmente soleados con temperaturas máximas oscilando entre los 35°C y mínimas de 23 °C. En otoño e invierno las temperaturas son templadas con un promedio de 18°C.

Figura 2. Mapa de ubicación de la estación hidrométrica 24192 Montemorelos en Nuevo León, México

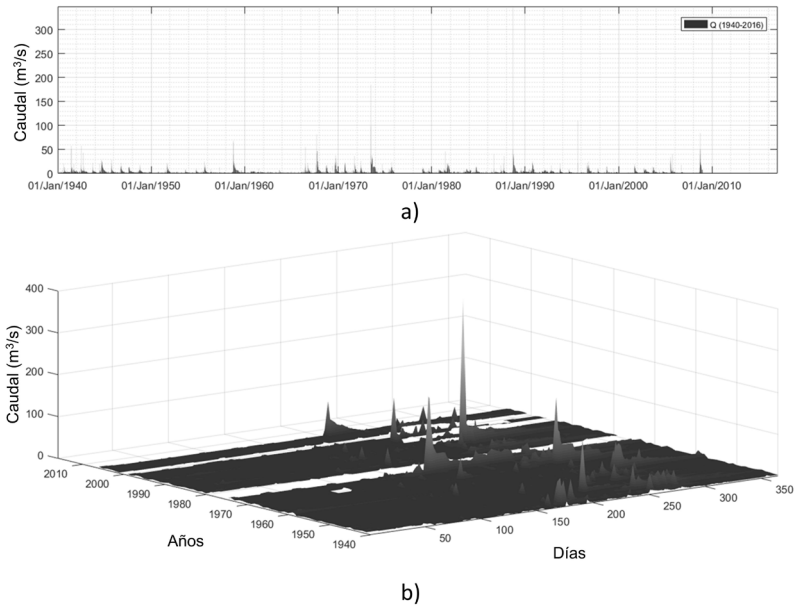


Fuente: elaboración propia.

3.2 Descripción de los datos

Dentro del Banco Nacional de Aguas Superficiales (BANDAS) de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) es identificada con la clave 24192. Su registro comienza desde el año 1940 y se cuenta con datos hidrométricos diarios hasta el año 2016. Asimismo, se cuentan con 13 días con caudal diario nulo (Q = 0 m^3/s), 5,031 días sin observaciones registradas y un total de 28,125 días con registro hidrométrico. El caudal máximo diario ha llegado a ser hasta de 348 m^3/s en el día 16 de septiembre de 1988 (Figura 3).

Figura 3 caudales diarios de la estación Montemorelos, clave CONAGUA 24,192: a) serie de tiempo de caudales diarios en m^3/s; b) representación 3D de la serie de tiempo de caudales diarios en m^3/s



Fuente: elaboración propia con base en Hydra-Eflow (Arévalo-Mejía *et al.*, 2022).

3.4 Evaluación de la alteración hidrológica

De la Figura 3b se aprecian dos períodos de caudales claramente marcados. El primero de ellos comienza en 1940 a 1970, caracterizado por caudales mínimos recurrentes durante el período de crecidas. El segundo es de 1980 al 2009, donde se puede apreciar claramente la carencia de los pequeños incrementos de caudales durante las crecidas. Por tanto, esta exploración cimenta las bases

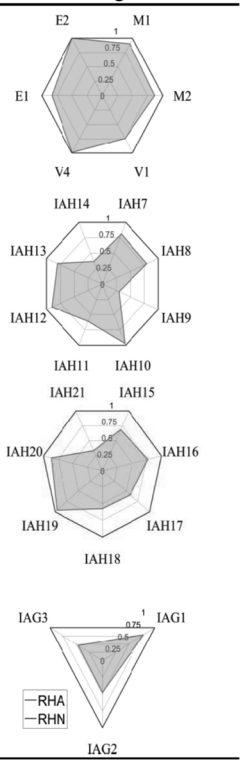
para dividir el régimen hidrológico natural (RHN) de la serie de caudales diarios de 1940 a 1970 del período de régimen hidrológico alterado (RHA) de 1980 al 2009. Al aplicar las ecuaciones de los índices IAHRIS a los datos de ambos períodos (RHN y RHA), se obtienen los resultados mostrados en la figura 4.

Figura 4. Resultados de la evaluación de alteración hidrológica en la estación 24192 Montemorelos

	Código y descripción	Valor	Nivel
Valores habituales	M1: Magnitud de aportaciones anuales	0.90	Nivel I
	M2: Magnitud de aportaciones mensuales	0.87	Nivel I
	V1: Variabilidad de las aportaciones anuales	0.74	Nivel II
	V4: Variabilidad de las aportaciones mensuales	0.99	Nivel I
	E1: Estacionalidad de máximos	0.83	Nivel I
	E2: Estacionalidad de mínimos	1.00	Nivel I
Extremos máximos	IAH7: Magnitud de avenidas máximas	0.81	Nivel I
	IAH8: Magnitud del caudal genrador del lecho	0.80	Nivel II
	IAH9: Magnitud del caudal de conectividad	0.30	Nivel IV
	IAH10: Magnitud de avenidas habituales	0.97	Nivel I
	IAH11: Variabilidad de avenidas máximas	0.61	Nivel II
	IAH12: Variabilidad de avenidas habituales	0.90	Nivel I
	IAH13: Duración de avenidas	0.80	Nivel I
	IAH14: Estacionalidad de avenidas	0.37	Nivel IV
Extremos mínimos	IAH15: Magnitud de sequías extremas	0.69	Nivel II
	IAH16: Magnitud de sequías habituales	0.77	Nivel II
	IAH17: Variabilidad de sequías extremas	0.59	Nivel III
	IAH18: Variabilidad de sequías habituales	0.57	Nivel III
	IAH19: Duración de sequías	0.96	Nivel I
	IAH20: No. de días con caudal no nulo	0.87	Nivel I
	IAH21: Estacionalidad de sequías	0.33	Nivel IV
Resumen	IAG1: Índice global de valores habituales	**0.79**	Nivel I
	IAG2: Índice global de valores máximos	**0.48**	Nivel III
	IAG3: Índice global de valores mínimos	**0.46**	Nivel III

Detalle	Mes	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	No se indica inversión del cálculo
	IAH14	0.0	0.8	1.0	0.8	0.8	0.0	0.0	0.0	**0.0**	**0.0**	**1.0**	**0**	
	IAH20	1.0	1.0	1.0	1.0	0.0	1.0	1.0	0.4	1.0	1.0	1.0	1	
	IAH21	0.0	0.0	1.0	0.6	0.8	0.8	0.6	0.2	0.0	0.0	0.0	0	

* El índice se calculó con el inverso



Fuente: elaboración propia con base en Hydra-Eflow (Arévalo-Mejía *et al.*, 2022).

Estos resultados revelan una evaluación en estado pobre para dos índices parciales en el grupo de caudales máximos, mientras un solo índice parcial queda evaluado en esta clasificación dentro del grupo de caudales mínimos. Para el caso de los valores extremos máximos, el índice IAH9 caudal de conectividad presenta una valoración de 0.30. El caudal de conectividad se enuentra fuertemente ligado con el seccionamiento longitudinal o transversal del

río. Esto favorece la intrusión de vegetación al cauce del río y aislamiento de comunidades de peces. El IAH12 estacionalidad de avenidas, muestra un desfase temporal dos meses entre los valores máximos mensuales. Este desfase podría ser producto de las reglas de operación en la obra de regulación El Chapotal. Sin embargo, tienen repercusiones directas en el estado del microecosistema aguas abajo, favoreciendo la intrusión de especies invasoras y modificando los patrones de ciclo de vida de las especies dependientes del recurso hídrico.

De manera similar, el IAH21 estacionalidad de estiaje, mostró una valoración de 0.33 que indica un desfase temporal en los valores mínimos de hasta dos meses. De manera análoga a la dinámica de los caudales máximos, la diferencia estacional de los valores mínimos podrían ser producto de reglas de operación de la presa derivadora El Chapotal; o bien, en cambios significativos de la precipitación. Esta modificación altera los ecosistemas dependientes de la circulación mínima de agua, principalmente a grupos de especies que aprovechan la reducción del caudal para efectos de reproducción o desove.

A pesar de las valoraciones y efectos mencionados, los índices globales (IAHG) muestran una valoración mayor que 0.16 (Cuadro 2) en los tres componentes del régimen analizados. Por tanto, se concluye que, para la temporalidad analizada, la estación 24192 Montemorelos no se encuentre alterada en cuanto a su régimen hidrológico.

Conclusiones

La valoración de la alteración hidrológica en los ríos permite identificar modificaciones en los componentes de sus regímenes. A pesar de no proporcionar información sobre los agentes modificadores del escurrimiento, brindan un panorama general y particular del estado en cuestión. Las series divididas en parte 'natural' y 'alterada' consolidan la pauta para establecer condiciones de referencia en cada cauce; esta línea base es indispensable para el desarrollo de métodos regionales de estimación del caudal ecológico.

El análisis del régimen de valores habituales, eventos extremos máximos y eventos extremos mínimos proporciona resultados más detallados que los análisis de percentiles sugeridos por la normatividad mexicana vigente. Adicionalmente, los índices IAHRIS, permiten clasificar las cuencas por tipo de alteración de manera cualitativa y cuantitativa.

Por otro lado, los ríos son el resultado de un equilibro dinámico entre las variables climáticas, condiciones morfológicas y balance de energía en el proceso de escurrimiento. Lo anterior lleva a tener sistemas dinámicos cuyas condiciones varían en el tiempo y territorio. Así, la evaluación del estado del régimen hidrológico debe realizarse periódicamente para monitorear los cauces en rehabilitación e identificar nuevas áreas afectadas; por ello, se recomienda que el análisis se realice cada 5 o 10 años.

El retorno a las condiciones de referencia puede ser una tarea poco factible en cuencas que han sido alteradas por períodos prolongados (centro, norte y costa oeste de México) y que tienen una importancia socioeconómica. En dichos casos, se recomienda tomar los primeros años de alteración como nuevas condiciones de referencia. Si bien son caudales alterados, brindan una base para las políticas de regulación; la valoración cuantitativa y cualitativa de los componentes del régimen como magnitud, variabilidad y duración pueden emplearse en el diseño de regímenes para rehabilitación y/o conservación. De esta manera, los caudales de diseño se comparan con los del régimen 'natural' verificando que se mantengan en condiciones no alteradas.

Finalmente, la nueva aportación de este estudio radica en la valoración cuantitativa de los componentes del régimen. Garrido *et al.* (2010) muestra los riesgos potenciales en el caudal ecológico de manera cualitativa; resaltando que el estudio sólo evalúa las alteraciones en el régimen hidrológico de los caudales, recomendando complementar los resultados con estudios climáticos, de calidad de agua y biológicos.

Bibliografía

Acreman, M., Arthington, A., Colloff, M., Couch, C., Neville, D., Dyer, F., Young, W. (2014). Environmental flows for natural, hybrid, and novel riverine ecosystems in a changing world. *Ecol Environ., 12*(8), 466-473.

Arévalo-Mejía, Ricardo, Leblois, Étienne, Mastachi-Loza, Carlos Alberto, Salinas-Tapia, Humberto, Bâ, Khalidou M., Vilchis-Francés, Aleida Yadira, Becerril-Piña, Rocío y Diaz-Delgado, Carlos (2022). I*ntegrated Hydro Informatics Tool to Assess Hydrological Alteration on Gauged Sites: Hydra-Eflow*. SSRN: https://ssrn.com/abstract=4102829 or http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4102829

Arthington, A. (2012). *Environmental flows: saving rivers in the third millenium. Berkeley, California*. University of California Press.

Auerbach, D., Poff, N., McShane, R., Merritt, D., Pyne, M., y Wilding, T. (2012). Streams past and future: fluvial responses to rapid environmental change in the context of historical variation. In J. Wiens, G. Hayward, H. Safford, y C. Griffen, *Historical environmental variation in conservation and natural resource management*. pp. 232-245. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd.

Bâ, K. (2016). *Environmental flow and hydrologic alteration on gauged basins*. Mali.

Carlisle, D., Wolock, D., y Meador, M. (2011). Alteration of streamflow magnitudes and potential ecological consecuences: a multuregional assessment. Front. *Ecol. Environ*. 9, 264-270.

CIS-WFD. (2003). Guidance on establishing referece conditions and ecological status class boundaries for inland surface waters. *Final report (7.0). Common Implementtion Strategy - Water Framework Directive*.

DOF, D. (2012). NMX-AA-159-SCFI-2012: *Norma oficial mexicana que establece el procedimiento para la determinación del caudal ecológico en cuencas hidrológicas.*

Durance, I., y Ormerod, S. (2007). Climate change effects on upland stream macroinvertebrates over a 25-year period. *Glob. Chang Biol.* 13, 942-957.

Fall, C., Hinojosa-Peña, A., & Carreño-de-León, M.C. (2007). Design of a monitoring network and assessment of the pollution on the Lerma river and its tributaries by wastewaters disposal. The Science of the total environment, 373 1, 208-19. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.10.053

Garrido, A., Cuevas, M. L., Cotler, H., González, D. I., y Tharme, R. (2010). *Evaluación del grado de alteración ecohidrológica de los ríos y corrientes superficiales de México.* SEMARNAT.

Hickey, J., & Salas, J. (1995). Environmental effects of extreme floods. Perugua (Italy): U.S. - Italy Research Workshop on Hydrometeorology, Impacts and Management oof Extreme Floods. https://www.researchgate.net/publication/255593265_Environmental_effects_of_extreme_floods#fullTextFileContent

Lawrence, J. E., Pavia, C. P., Kaing, S., Bischel, H. N., Luthy, R. G., y Resh, V. H. (2014). Recycled water for augmenting urban streams in mediterranean-climate regions: a potencial approoach for riparian ecosystem enhancement. Hydrological *Sciences Journal, 59*(3-4), 488-501.

Llamas, J. (1993). *Hidrología general.* Universidad del País Vasco.

Mackay, S., Arthington, A., y James, C. (2014). Classification and comparisson of natural and altered flow regimes to support an Australian trial of the Ecological Limits of Hydrological Alteration framework. *Ecohydrology*. 7, 1485-1507.

Maheu, A., Poff, N., y St-Hilaire, A. (2016). A classification of stream water temperature regimes in the conterminous United States. *River Res*. Appl. 32, 896-906.

Martínez Santa-María, C., y Fernández Yuste, J. A. (2021). *Índices de alteración hidrológica (IAHRIS 3.0).* Financiado por la Dirección General del Agua del Ministerio del Medio Ambiente de España mediante convenio con el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).

Mathews, R., y Richter, B. (2007). Application of the indicators of hydrologic alteration software in environmeantal flow-setting. J*ournal of the American Water Resources Association*. (43), 1-14.

Moss, B. R. (2010). *Ecology of freshwater*. Chichester: Wiley-Clackwell.

Naiman, R., Bunn, S., Nilsson, C., Petts, G., Pinay, G., y Thompson, L. (2002). Legitimizing fluvial ecosystems as users of water: an overview. *Environmental Management, 30*(4), pp. 455-467.

O'Brien, G., Dickens, C., Hines, E., Wepener, V., Stassen, R., Quayle, L., y Landis, W. (2018). A regional-scale ecological risk framework for environmental flow evaluations. Hydrol. *Earth Syst. Sci.* 22, 957-975.

Olden, J. D., y Poff, N. L. (2003). Redundancy and the choice of hydrologic indeces for characterizing stream-flow regimes. *River Research and Applications*. (19), 101-121.

Parades-Tavares, J., Gómez-Albores, M., Mastachi-Loza, C., Díaz-Delgado, C., Becerril-Piña, R., Martínez-Valdés, H., y Bâ, K. (2018). Impacts of Climate Change on the Irrigation Districts of the Rio Bravo Basin. *Water, 10*(3), 258.

Poff, N. L., y Zimmerman, J. K. (2010). Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmeantal flows. *Freshwater Biology*. (55), 194-205.

Poff, N., Allan, J., Bain, M., Karr, J., Prestegaard, K., Richter, B., y Stromberg, J. (1997). The natural flow regime. A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*. (47), 769-784.

Poff, N., Tharme, R., y Arthington, A. (2017). Evolution of environmental flows assessment science, principles, and methodologies. En *Water for the environment,* pp. 203-236.

Richter, B. D., Baumgartner, J. V., Braaund, P., y Powell, J. (1997). How much water does a river need? *Freshwater Biology.* (37), 231-249.

Speed, R., Binney, J., Pusey, B., y Catford, J. (2011). Policy measures, mechanisms, and framework for addresing environmental flows. *ACEDP Project Report. Brisbane*, QLD: International Water Centre.

St-Hilaire, A., Daigle, A., Beveridge, D., Caissie, D., y Benyahya, L. (2009). Analyse multivariée des indices d'altération hydrologique de l'est du Canada. *Rapport de recherche R1058.*

Wohl, E., Bledsoe, B., Jacobson, R., Poff, N., Rathburn, S., Walters, D. *et al.* (2015). The natural sediment regime in rivers: broadening the foundation for ecosystem management. *BioScience.* 65, 358-371.

Capítulo 13. Propuesta de un plan de gestión para el suministro de agua potable en Villa Victoria

Aleida Yadira Vilchis Francés [1]
Dafne Luna Pérez [2]

Introducción

Existen grandes retos en términos de gestión y desarrollo de los recursos hídricos en México, por lo que es necesario implementar una metodología que permita el manejo adecuado de estos recursos. Esto implica un proceso de modernización y desarrollo institucional, orientado a la construcción de una gobernanza más participativa, responsable y democrática (SMA, 2007). De acuerdo con la Comisión Internacional de Grandes Presas (*International Commission on Large Dams*, ICOLD por sus siglas en inglés); existen alrededor de 4,000 presas en México cuya capacidad total de almacenamiento es de 150 km^3 de agua. Esta disponibilidad de agua permite satisfacer las demandas de los principales sectores productivos y las necesidades de la población (SMA, 2007). El municipio de Villa Victoria cuenta con la Presa Villa Victoria, uno de los cuerpos de agua más importantes del Estado de México y la Zona Metropolitana del Valle de México (GRAVM, 2005). Este municipio tiene la riqueza hídrica suficiente para satisfacer a toda su población, sin embargo, solamente el 48% de la población tiene acceso al agua entubada (INEGI, 2022).

El gran problema al que se enfrenta la localidad de La Campanilla, en el municipio de Villa Victoria es también la falta de acceso al agua potable. Los habitantes se ven obligados a caminar de uno a tres kilómetros diarios a cuerpos de agua cercanos para poder satisfacer sus necesidades. De acuerdo con el INEGI (2022), la localidad La Campanilla tiene el 69.9% de habitantes en

1 Doctora en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Red Lerma. Universidad Autónoma del Estado de México.

2 Estudiante egresada de la Licenciatura de Geología Ambiental y Recursos Hídricos de la Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

situación de pobreza, por lo que resulta difícil comprar pipas de agua para cubrir las necesidades de agua. Según el Plan de Desarrollo Municipal de Villa Victoria para el año 2016 (MVV,2016) otros factores que afectan el suministro de agua potable de esta localidad son: la gran dispersión de la población en el municipio y las pendientes que presenta el territorio, por lo que la introducción de infraestructura de agua potable y saneamiento resultan altamente costosos. Por esta razón, el aumento de la población en la región es un indicador de la reducción del agua per cápita, ya que en 1990 la tasa de crecimiento medio anual fue de 2.19 y para 2010 de 3.93 (MVV, 2016).

De acuerdo con (INEGI, 2022), la localidad La Campanilla contaba en 2015 con 306 viviendas sin agua potable entubada, lo que representó el 100% de viviendas habitadas en la localidad. Asimismo, esta localidad representaba el noveno lugar con más habitantes del municipio (mayor a 1,815 habitantes). Un problema mas que la población de estudio no tiene acceso al agua almacenada en la Presa Villa Victoria, pues el volumen de almacenamiento está destinado para algunos municipios del Estado de México y alcaldías de la Ciudad de México (GRAVM, 2005). Según la información recolectada en campo, los habitantes caminan de uno a tres kilómetros a los cuerpos de agua más cercanos para poder cubrir sus necesidades. La crisis del agua en el municipio se debe a un problema de gobierno reflejado en una débil institución en la GIRH. Por ello el objetivo de este estudio es plantear una propuesta de un Plan de Gestión para abastecimiento de agua potable, en el que se expongan estrategias con un enfoque de igualdad y justicia social, mejorando la supervivencia, salud, economía y el bienestar de la localidad La Campanilla.

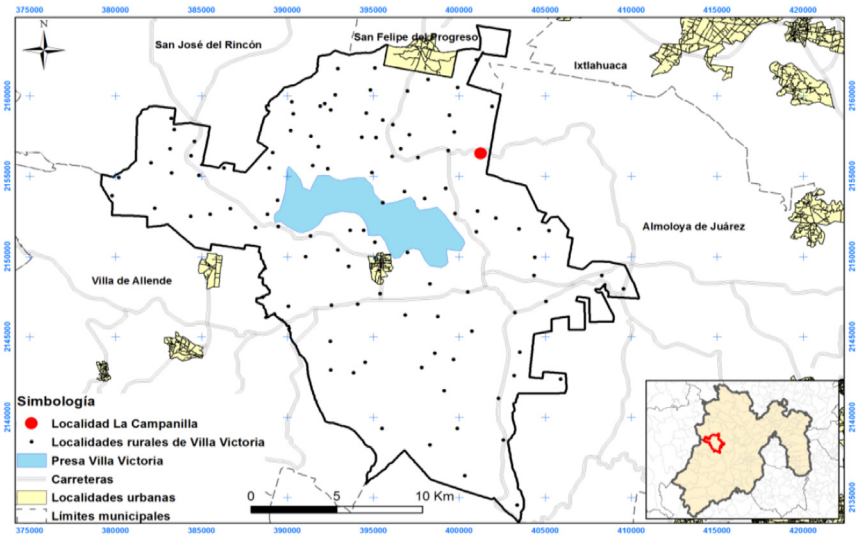
Asimismo, las acciones específicas que coadyuvaron a la concreción del objetivo fueron:

i. Realizar la caracterización hidrológica, social, económica, ambiental, y física del municipio de Villa Victoria.
ii. Analizar las causas y consecuencias a las que están sometidas la localidad La Campanilla por la falta de acceso al agua potable.
iii. Proponer estrategias de factibilidad que fortalezcan el suministro de agua potable, basada en los principios de la GIRH para la localidad La Campanilla.
iv. Evaluar las estrategias, además de definir los programas, proyectos y acciones por realizar. Especificando, los responsables que lo llevarán a cabo mediante la vinculación con las autoridades locales, mediante talleres de planeación estratégica.

1. Zona de estudio: localidad de La Campanilla, municipio de Villa Victoria, Estado de México

El Estado de México se localiza en el centro de la República Mexicana, entre los paralelos 18° 21′ 57″ y 20° 17′ 27″ de Latitud Norte y entre los meridianos 98° 35′ 50″ y 100° 36′ 45″ de Longitud Oeste, con respecto al meridiano de Greenwich (SMA, 2007). La superficie del Estado de México representa el 1.15 % del territorio nacional (INEGI, 2017). El municipio de Villa Victoria en el Estado de México se localiza a 46 kilómetros al Noroeste de la ciudad de Toluca y a 111 kilómetros de la Cuidad de México (Figura 1); pertenece a la Región Hidrológica 18 del Río Balsas, cuenca hidrológica del Río Cutzamala y subcuenca del Río Tilostoc, encontrándose en una unidad hidrogeológica con materiales de permeabilidad media a alta, la cual es originada por fracturamiento (CONAGUA, 2015).

Figura 1. Mapa de ubicación del municipio de Villa Victoria



Fuente: elaboración propia, con base en datos del INEGI (2022).

El clima predominante en el municipio de Villa Victoria es subhúmedo con lluvias durante el verano y su temperatura media anual es de 12.5°C con máxima de 28°C (MVV, 2016). La precipitación media anual es de 800 a 1,100 milímetros (INEGI, 2017). En verano se presentan lluvias abundantes entre los meses de junio y agosto, reduciendo su intensidad en septiembre. La frecuencia de las heladas se registra en un período de más de 120 días al año

además en un rango de granizadas de más de 18 días (SMA, 2007). Geológicamente, el municipio de Villa Victoria está dentro de la zona volcánica central de México, por lo que se encuentran rocas volcánicas de diferentes episodios, además de coladas lávicas, depósitos de arena y de ceniza (Demant, 1978).

El suelo predominante es el Andosol, compuesto principalmente por ceniza, de colores obscuros con gran capacidad de retención de humedad, susceptible a la erosión eólica con bajos rendimientos agrícolas por la retención del fósforo que no puede ser absorbido por las plantas (MVV, 2003). Otro tipo de suelo que se encuentran en este municipio son el Acrisol y Feozem (INEGI, 2022). Dentro del municipio de Villa Victoria se localizan diversos ríos, mantos acuíferos y manantiales (INEGI, 2022), así como el cuerpo de agua más importante denominado Presa Villa Victoria, que conecta el agua que desciende de las montañas aledañas. Entre todos estos cuerpos de agua, se capta un total de 4,191,600 de litros diarios, suficientes para suministrar agua potable a todo el municipio. Sin embargo, es necesario una ampliación de redes locales que no se hace aproximadamente 20 años: se encuentran deterioradas, presentan fugas, perdiendo el 25% del agua (MVV, 2003). Las coberturas vegetales de la zona de estudio son predominantemente los bosques de coníferas donde habitan diversas especies de mamíferos, aves e insectos (INEGI, 2022).

La tasa de crecimiento demográfico en el municipio de Villa Victoria se ha incrementado desde 1990, se estima, que para 2030 haya más de 138,000 habitantes (MVV, 2016). Según datos obtenidos por el INEGI, el municipio registró en 2015 22,354 viviendas, con un incremento de 3,672 viviendas entre 2010 y 2015. En promedio, se construyeron 734 casas por año, registrando una densidad de 53 viviendas por kilómetro cuadrado. El crecimiento de población es causante del incremento de viviendas lo que conlleva a una serie de conflictos como: el suministro de agua, energía eléctrica, alumbrado público, entre otros servicios públicos además de infraestructura vial y de transporte, basura, deterioro de la imagen urbana, entre otros (MVV, 2016).

2. Definiciones

Aspectos legales: el marco legal contiene leyes, normas, reglamentos federales y estatales debido a que estos son de gran relevancia pues fundamenta el Plan GIRH y cualquier acción que se realice en materia de agua en México. Se cuenta con la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos que considera el derecho al acceso al agua para todo individuo. En la Ley Federal de Derechos se proporcionan las obligaciones del pago de derechos sobre el recurso hídrico. La Ley de Aguas Nacionales tiene por objeto regular la explotación, uso o aprovechamiento del agua, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr un desarrollo sustentable. En esta misma Ley, considera que la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos es de carácter obligatorio en la formulación, implantación, evaluación

de la planificación y programación hídrica. Por otra parte, en el *Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales*, los usuarios podrán explotar, usar o aprovechar el agua, a través de la organización más conveniente.

La *Constitución del Estado Libre y Soberano de México* considera que toda persona tiene derecho al acceso y disposición suficiente, accesible y salubre del agua, para consumo personal y doméstico. En la *Ley del Agua para el Estado de México y Municipios* toma en cuenta la regulación de la prestación de servicios de agua potable, drenaje y alcantarillado; saneamiento, tratamiento de aguas residuales y su reúso. En la *Ley del Desarrollo Social del Estado de México* considera se deben abordar prioritariamente las obras de infraestructura para agua potable y drenaje. *La Ley Orgánica Municipal del Estado de México* considera la prestación, explotación, administración y conservación de los servicios públicos municipales de agua potable, alcantarillado y saneamiento de aguas residual. También, en el *Reglamento de la Ley del Agua para el Estado de México y Municipios* menciona los beneficios de los programas y medidas que aprueban las autoridades; además de la participación y presentación de programas para el uso y fomento de la cultura del agua.

GIRH en México: la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos persigue el desarrollo y suministro coordinado del agua, la tierra y los recursos naturales relacionados. Su enfoque propicia el aprovechamiento del agua, la cual, es destinada para la obtención de objetivos nacionales de desarrollo económico, social, con equidad y sustentabilidad ambiental. En nuestro país, el sector hídrico se encuentra ante un nuevo reto: implementar la GIRH a nivel nacional (Valencia *et al*., 2007).

Sistema Hidroeléctrico Cutzamala: es un sistema de almacenamiento, conducción, potabilización y distribución de agua; integrado por 7 presas y 6 plantas de bombeo (GRAVM, 2005). El Sistema Cutzamala bombea agua desde los 1,600 msnm de altitud hasta los 2,702 msnm. Inició su operación en 1982; actualmente el sistema beneficia a 11 alcaldías de la CDMX y 11 municipios del Estado de México (GRAVM, 2005). La Presa Villa Victoria es una de las 7 que integran el Sistema Cutzamala. Tiene capacidad de almacenaje (186.3 millones de m^3) y aporta 4 m^3/s de agua al mismo sistema (GRAVM, 2005). Según datos del Plan de Desarrollo Municipal en el 2003, se mencionó que el municipio de Villa Victoria la distribución del líquido era de un 50% para actividades domésticas, 30% para actividades agropecuarias y 20% para actividades comerciales y de servicios (pequeña y mediana industria). De la misma manera, el municipio cuenta con 15 fuentes de abastecimiento futuro, 10 subterráneas y 5 superficiales, lo que permite garantizar la presencia del vital líquido en el desarrollo municipal futuro a corto y mediano plazo (MVV, 2003). Sin embargo, en el Plan de Desarrollo Municipal de Villa Victoria Estado de México, 2016 (MVV, 2016) menciona que la prestación del agua potable se enfrentó a factores que restringían el suministro de ésta. No obstante, justi-

fica que no hay abastecimiento del agua potable debido a la dispersión y pendientes abruptas del municipio. La cobertura de agua potable en México no tiene que ver con la disponibilidad del recurso hídrico, sino que hay grandes diferencias y desigualdades ya que no se atiende adecuadamente la cobertura de servicios y viceversa. Mientras que el agua potable en Villa Victoria es del 48.1 % en la población de forma entubada (MVV, 2016).

Crisis del agua: se vincula con la reducción de la disponibilidad de agua potable en calidad y cantidad que están afrontando en diversas partes del planeta (Santacruz, 2007). El agua se registra en la cadena de las necesidades absolutas para la conservación de las especies vivientes; además, ésta no es sustituible e irremplazable (Rolland y Cárdenas, 2010). El crecimiento poblacional provoca la crisis del agua e incrementa en los años venideros (Santacruz, 2007). El problema del agua en México aborda múltiples dimensiones, reconociendo la creciente escasez del recurso y la contaminación que afecta además de la cantidad y calidad que permiten evaluar el alcance de la crisis; en México, se interpone en la transformación hacia el desarrollo sustentable (Carabias *et al.*, 2005).

Gobernanza: según Domínguez (2011) define el término como un proceso de cambios que se han transmitido entre el gobierno y la sociedad para reconstruir el sentido y la capacidad de su dirección de la sociedad y su relación con el ambiente. También se refiere a los procesos y sistemas en la que opera la sociedad, tratando sobre procesos y mecanismos de interacción entre los actores gubernamentales y no gubernamentales. Aún más, se describe como la interacción de los sistemas políticos, sociales, económicos y administrativos que regulan el desarrollo y gestión del agua en los diferentes niveles de la sociedad, respondiendo a las necesidades ambientales, económicas, sociales y políticas del Estado. La construcción de gobierno como una forma de cuidar y vigilar, es muy importante para proveer de agua segura, continua y accesible para todos en condiciones equitativas.

Desarrollo sustentable: se define como el equilibrio que existe entre una comunidad y su medio ambiente para satisfacer sus necesidades. Estrella y González (2014) mencionan que la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y Desarrollo lo define como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer las capacidades de las futuras generaciones atendiendo sus propios requerimientos. En México se tiene la posibilidad de lograr una administración sustentable de agua y con ello contribuir al desarrollo sustentable del país. Contando con el recurso natural, el marco institucional, el orden jurídico, los recursos humanos y económicos. Sin embargo, no han sido suficientes para lograr un desarrollo sustentable, por lo que es necesario ajustar enfoques y estrategias mediante una política hídrica sustentable, orientadas a la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (Carabias *et al.*, 2005).

Planeación táctica y planeación estratégica: de acuerdo con Morrisey (1996a), se definen tres fases de la planeación. 1) Pensamiento estratégico: orienta las fases más intuitivas del proceso que dan lugar a la misión, visión y su estrategia. Está diseñado para crear la perspectiva futura e instituye los fundamentos sobre las que se harán todas las determinaciones de planeación. 2) Planeación estratégica: unión del pensamiento intuitivo y el analítico que da lugar a las proyecciones de las posiciones futuras que se desea lograr, además, está diseñada para evaluar y activar la misión, visión y estrategia establecidas durante la primera fase. A lo largo de los años, la planeación estratégica y de largo plazo se consideraron como sinónimos; la planeación a largo plazo incluye la aplicación de la intuición y el análisis para determinar las posiciones futuras que se deben alcanzar. Es de gran relevancia debido que ampara un enfoque en el futuro y en el presente, reforzando los principios de la misión, visión y estrategia; también, promueve la planeación y la comunicación interdisciplinarias además de establecer prioridades en el destino de los recursos. 3) Planeación táctica: es esencialmente un planteamiento analítico con algunos matices intuitivos, dando lugar a acciones específicas que afectan el rendimiento. Está diseñada para elaborar los resultados a corto plazo que se orientan para llevar a cabo la misión de la empresa y alcanzar las posiciones futuras que fueron proyectadas. Define lo que desea o pretende lograr además de cómo y cuándo se aplicará y quien será el encargado; siendo éste un medio a través del cual se asignará su plan estratégico.

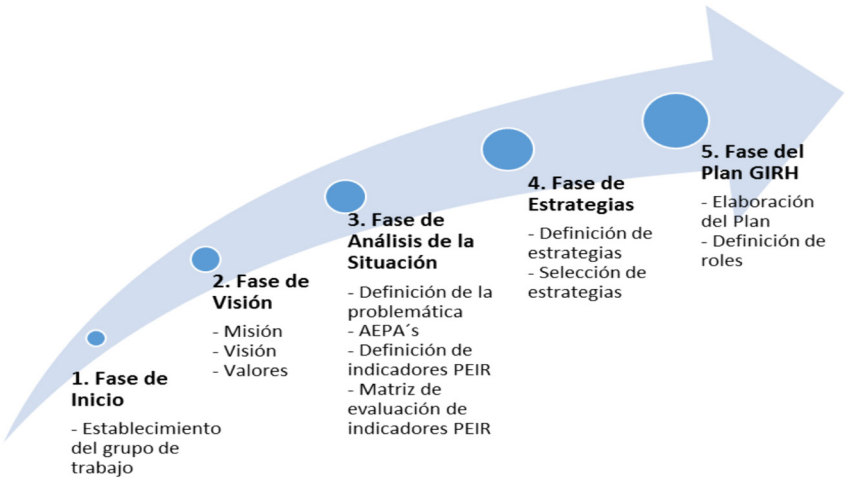
3. Método

La metodología está basada en la Guía de Planeación estratégica de la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos de la cuenca Lerma – Chapala Santiago, así como en manuales para la GIRH de la GWP (Díaz-Delgado *et al*., 2009). En la Figura 2 se muestra el proceso general de la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH) propuesto para coadyuvar en la solución al problema ambiental, lo cual se desarrolla en cinco fases:

- Fase de Inicio. Contempla la conformación del grupo de trabajo para coordinar y organizar esfuerzos para lograr la meta deseada.
- Fase de Visión. Se definen las aspiraciones y principios guía para las acciones futuras relacionadas con el recurso hídrico.
- Fase de Análisis de la Situación. Integra el conocimiento de la situación de la problemática de la zona de estudio, además del entendimiento de las necesidades para resolver dicha situación.
- Fase de Estrategias. Se establecen las soluciones propuestas por el grupo de trabajo para resolver la problemática.
- Fase del Plan GIRH. Se define cómo se realizará cada estrategia, tomando en cuenta el nivel de participación de los miembros del grupo

de trabajo y otras instituciones gubernamentales locales como de los habitantes de la zona de estudio.

Figura 2. Fases de la metodología desarrollada de acuerdo con la GIRH



Fuente: elaboración propia y adaptada de (Díaz-Delgado *et al.*, 2009).

a) Fase de Inicio

Establecimiento del grupo de trabajo: el establecimiento del grupo de trabajo es esencial para iniciar un proceso de planeación con un enfoque GIRH. Se deben generar compromisos con los gobiernos locales coordinar esfuerzos y lograr buena gestión en los recursos hídricos en beneficio de los habitantes. En esencia, se deben considerar las decisiones gubernamentales de las áreas de ecología, ambiente, salud, economía y demás sectores que compartan la problemática que se quiere revertir. Este grupo de trabajo deberá ejecutar las fases de la metodología propuesta, proponiendo realizar tres talleres donde se puedan obtener resultados de cada proceso; conseguir finalmente el Plan de Gestión Integrada de Recursos Hídricos que permita resolver la problemática analizada (Cuadro 1).

Cuadro 1. Talleres con el grupo de trabajo

Taller	Sesión	Fase de metodología GIRH	Proceso
Taller 1	Primera sesión	Visión	- Misión - Visión - Valores
	Segunda sesión	Análisis de la situación	- Definición de la problemática - Definición de AEPA's - Indicadores PEIR - Matríz de evaluación de indicadores PEIR
Taller 2	Primera sesión	Estrategias	- Definición de estrategias - Selección de estrategias
Taller 3	Primera sesión	Plan GIRH	- Elaboración del Plan - Responsables de roles

Fuente: elaboración propia.

b) Fase de Visión

Misión: es la descripción actual del equipo de trabajo hace por los habitantes en la resolución de la problemática ambiental. Para su declaración, debe responder a las preguntas ¿Quiénes somos? ¿Qué hacemos? y ¿Por qué estamos aquí? (Morrisey, 1996a).

Visión: es una clara y positiva declaración que representa lo que el equipo de trabajo desea a futuro y pueda alcanzarse de manera exitosa. La finalidad es recordar y estimular a los integrantes del equipo de trabajo para resolver la problemática ambiental en beneficio de los habitantes (Morrisey, 1996a).

Valores: son características que define el equipo de trabajo como eje para su crecimiento. Los valores deberán apoyar al objetivo general que se persigue, resolviendo la problemática, describiendo sus aspiraciones y mejorando el desarrollo de los habitantes (Cota, 2002).

c) Fase de Análisis de la Situación

Definición de la problemática: el propósito es caracterizar la situación actual, así como deducir los ajustes necesarios. Para la descripción de la problemática es importante integrar los datos, la información, así como la experiencia y conocimiento empírico de los habitantes de la zona de estudio como del grupo de trabajo relacionados con el problema. Una herramienta simple y fácil de usar para establecer causas y efectos es el Árbol del Problemas, donde las raíces colocan las causas que han originado el problema, las ramas por su parte colocan los efectos.

Áreas Estratégicas de Planeación y Articulación (AEPA´s): representan las categorías de los aspectos estratégicos y críticos que pueden identificarse para determinar los objetivos a largo plazo; éstas se enfocan en el futuro y tienen un alcance más amplio directa e indirectamente en la misión, visión y

las estrategias; requiriendo de trabajo interdisciplinario. Las AEPA´s constituyen el factor que trasporta el sistema a una situación de origen (antes de la planeación), hacia la situación de futuro que se desea como resultado de la implementación del proceso. Para determinar las AEPA´s se toman en cuenta áreas financieras como no financieras, enfocándose en aspectos del futuro y con factores que lleven a logros alcanzables (Morrisey, 1996b).

Sistema de indicadores Presión-Estado-Impacto-Respuesta (PEIR): es una herramienta metodológica que actúa como constructor del conocimiento, útil para el diseño, implementación y evaluación de políticas públicas (Díaz-Delgado *et al.*, 2009). Los indicadores son de tipo Presión, Estado Impacto y Respuesta. Presión responde a la pregunta ¿Por qué está pasando? (causas humanas y naturales). Estado responde ¿Qué está pasando? (condiciones ambientales), Impacto: ¿Cuáles son las consecuencias? (en temas de salud, economía, sociedad y ecología) y para Respuesta ¿Cuál es y cuál debería ser la respuesta? Para facilitar la comprensión de estos indicadores, es útil hacer uso de herramientas como Lluvia de ideas y el Árbol de Problemas.

Matriz de evaluación de indicadores: se colocan los indicadores PEIR analizados tanto de forma horizontal (eje X) como vertical (eje Y), creando una matriz. Conocer la relación o influencia entre indicadores debe responder a la pregunta ¿Si mejora la condición del indicador en eje X, también mejora la condición del indicador en eje Y? En la ubicación correspondiente del indicador eje X e indicador eje Y se coloca 1 si la respuesta es positiva, o bien, 0 para el caso contrario. Finalmente, se suman horizontalmente los vínculos entre indicadores.

Una vez obtenido el número de vínculos entre indicadores, se eligen los mejores de cada tipo (P, E, I y R), como aquellos que tienen las mayores relaciones o vínculos. Se ordenan los indicadores seleccionados de mayor a menor número de vínculos y se les da una jerarquía a partir de 1 (Díaz-Delgado *et al*., 2009). Luego se proporciona el peso de cada indicador en función de 4 rangos de jerarquías: si se seleccionan 12 indicadores -los cuales se integran por los mejores 3 indicadores tipo P, los 3 mejores indicadores tipo E, los mejores 3 indicadores de tipo I y los mejores 3 indicadores de tipo R- se deberán ordenar de mayor a menor número de vínculos y dar la jerarquía del 1° hasta el 12°; luego, los indicadores con jerarquía del 1° al 3° se les da un peso de 1, a los indicadores con jerarquía de 4° al 6° se les da un peso de 0.5, a los indicadores con jerarquía de 7° al 9° se les da un peso de 0.25 y las últimas tres jerarquías del 10° al 12° se les da un peso de 0.125). Si algunos de los indicadores seleccionados tienen el mismo número de vínculos o tiene algún otro indicador, éstos compartirán la misma jerarquía.

d) Fase de Estrategias

Definición de estrategias: procesos para establecer la dirección que se necesita para satisfacer la misión. Comprende la dirección hacia donde se dirige el objetivo general en el futuro: además, requiere la búsqueda de nuevas formas creativas para cumplir con los desafíos competitivos (Morrisey, 1996b). Se debe establecer por lo menos tres estrategias por cada AEPA definida. Para realizar este proceso, el equipo de trabajo puede hacer uso de la herramienta de Consensos, así como escuchar las opiniones de todos los miembros del grupo (Díaz-Delgado *et al*., 2009).

Selección de estrategias: se vincula cada estrategia con el peso de los mejores indicadores PEIR seleccionados en la matriz de evaluación. Es decir, se debe sumar cada indicador que esté relacionado con cada estrategia. Finalmente, se eligen el AEPA y las estrategias que tengan mayor puntaje de la suma de indicadores (Díaz-Delgado *et al*., 2009); de acuerdo con los recursos y el tiempo que cuente el equipo de trabajo.

e) Fase del Plan GIRH

Elaboración del Plan: de acuerdo con Díaz-Delgado *et al*. (2009) define como estrategia seleccionada, los programas, proyectos y acciones para llevarla a cabo. Asimismo, se toma en cuenta el enfoque de planeación estratégica que hace referencia a la unión del pensamiento intuitivo y analítico; dando lugar a las proyecciones de las posiciones futuras que se desea lograr, lo mismo de evaluar y activar la misión, visión y estrategias establecidas (Morrisey, 1996c).

Responsables y sus roles: el Plan GIRH deberá reunir las decisiones que por consenso establezcan a los responsables de cada acción, proyecto y programa de estrategias seleccionadas. Al definirlos con sus roles se lleva a cabo el plan GIRH. Es importante señalar que un factor de éxito es el nivel de compromiso que se obtiene desde el inicio con los actores involucrados; este proceso realiza una descripción del tiempo de ejecución, así como los recursos humanos, materiales y financieros que se requieren en cada acción del Plan GIRH (Díaz-Delgado *et al*., 2009).

4. Resultados: caso de estudio localidad La Campanilla, Villa Victoria, Estado de México

a) Fase de Inicio

Establecimiento del grupo de trabajo: de acuerdo con la metodología aplicada se integró el grupo de trabajo en el municipio de Villa Victoria, Estado de México, el cual se conforma por el Presidente Municipal y áreas como las direcciones de Salud, Medio Ambiente, Desarrollo Social y Desarrollo Económi-

co. Cabe señalar que la finalidad del equipo de trabajo es proponer acciones alternativas para solucionar el problema de abastecimiento en la localidad La Campanilla. Lograr la conformación de este grupo de trabajo, se realizó bajo diversas reuniones previas expliando la necesidad de crearlo y definir su forma de trabajo.

b) Fase de Visión

Derivado de la Sesión 1 del Primer Taller, se obtuvo la misión, visión y valores del equipo de trabajo. Se debe reconoce el compromiso por los integrantes, así como la aceptación de la nueva visión GIRH para el análisis, toma de decisiones y elaboración del Plan. Cabe señalar que los actores involucrados conocían sus fortalezas y limitaciones por lo que fue más sencillo establecer la misión, la visión y los valores. Las declaratorias de estos conceptos en consenso fueron las siguientes:

Misión. Ser un equipo de trabajo capaz de brindar el servicio público de agua potable en la localidad La Campanilla, municipio de Villa Victoria, Estado de México, garantizando la disponibilidad y calidad del recurso hídrico a las presentes y futuras generaciones.

Visión. Impulsar estrategias, proyectos y acciones que ayuden a garantizar el agua de cada persona en la localidad La Campanilla, municipio de Villa Victoria, Estado de México.

Valores. El equipo de trabajo actúa con base a la responsabilidad, justicia, igualdad, integración, honestidad, transparencia, compromiso y cooperación; lograrán coadyuvar en lo declarado en la misión y visión.

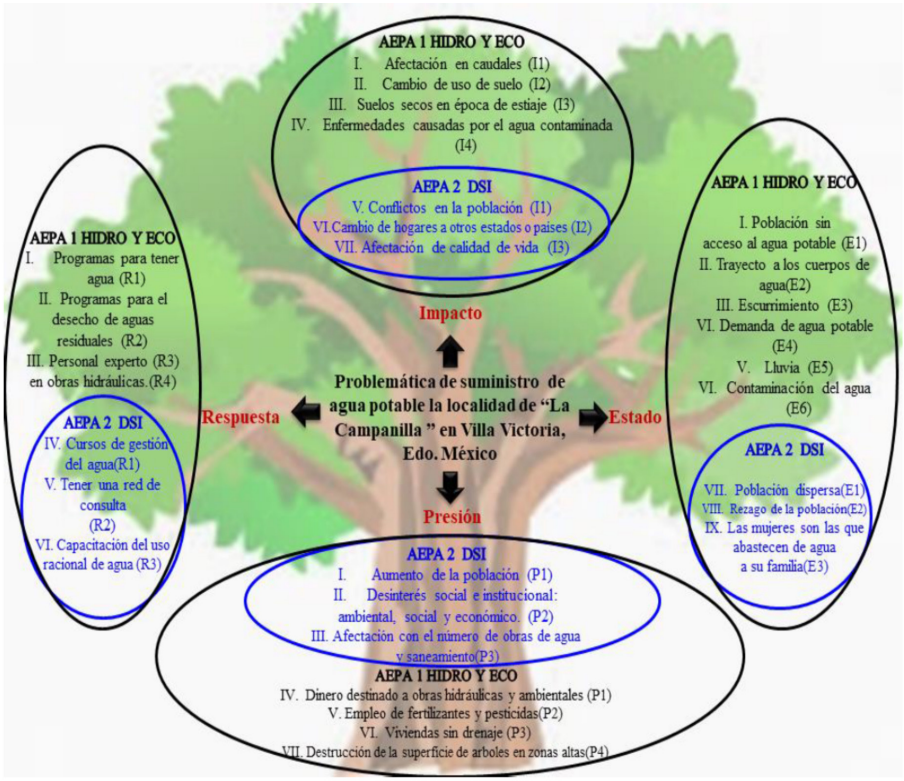
c) Fase de Análisis de la Situación

Como resultado de la Segunda Sesión del Taller 1, el equipo de trabajo define las AEPA's, la problemática, los indicadores PEIR y la matriz de evaluación de indicadores PEIR.

Definición de la problemática: se utiliza el Árbol de Problemas para analizar la problemática de suministro de agua en el municipio de Villa Victoria y, especialmente, en la localidad La Campanilla (Figura 3). Este taller integra también al equipo de trabajo personal del Comité de Agua Potable de la localidad. Entre las causas de la deficiencia en el suministro del agua (se eligieron por consenso) fueron el aumento de la población, dispersión de las viviendas y el recurso que se destina a las obras hidráulicas en la región. Por otro lado, el equipo de trabajo consideró los efectos más sobresalientes de la problemática, las enfermedades de la población por uso de agua contaminada, migración de los pobladores hacia otros lugares con mejores servicios y conflictos por el agua.

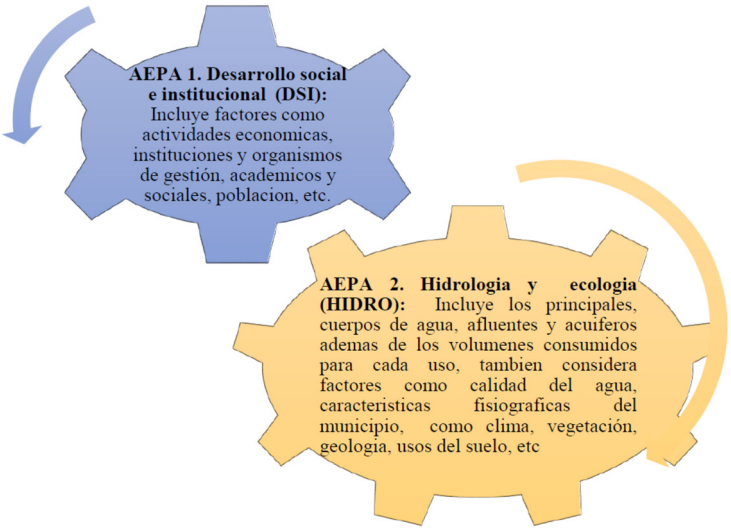
AEPA´s: las áreas estratégicas se eligieron por consenso y razón, considerando por qué son los aspectos estratégicos más críticos y relevantes que acontecen en la localidad para el suministro de agua. La AEPA 1 se tituló como Desarrollo Social e Institucional (DSI), mientras que AEPA 2 se define como Hidrología y Ecología (Hidro y Eco) Figura 4.

Figura 3. Árbol de problemas que el equipo de trabajo realizó sobre la problemática de suministro de agua potable en la localidad La Campanilla, municipio de Villa Victoria, Estado de México



Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Áreas estrategias (AEPA´s) que el grupo de trabajo definió para enfoque de soluciones en la problemática de suministro de agua



Fuente: elaboración propia.

Definición de indicadores PEIR: los indicadores que se muestran en la Figura 5 fueron obtenidos por discusión y consenso entre los integrantes del equipo de trabajo, derivados de la formulación del Árbol de Problemas. El sistema PEIR es una herramienta que ayudó a desglosar y analizar la relación causa-efecto de la problemática en la localidad La Campanilla. Para cada indicador PEIR, se define su unidad, nombre, descripción, responsable y el aspecto relacionado con el árbol de problemas. Con las características de los indicadores, se permite a los actores involucrados monitorear cada período de tiempo determinado.

Matriz de evaluación de indicadores: la parte más laboriosa del proceso, sin duda fue obtener las relaciones causa-efecto entre los indicadores e identificar aquellos que tuvieran más importancia en la problemática de la localidad La Campanilla. De acuerdo con la exhaustiva discusión y consenso entre los participantes, se eligieron 16 indicadores PEIR (considerando los dos mejores de cada tipo y para cada AEPA). La jerarquía que se otorgó a cada indicador seleccionado fue posible establecerla del 1° al 6°, ya que algunos indicadores compartían el mismo número de vínculos. Por lo tanto, los pesos establecidos para los indicadores estuvieron en el rango de 1.0 a 0.5 (Figura 6).

Figura 5. Indicadores del sistema PEIR obtenido por el equipo de trabajo

AEPA 1 Hidrología y Ecología						
No. de indicador	**Indicador**	**Descripción**	**Unidad**	**Tiempo**	**¿Cómo o de donde se obtiene?**	**¿A qué condición corresponde del árbol de problemas?**
Estado						
1 (E1)	Cobertura de agua potable	Habitantes de la localidad sin acceso a agua potable	%	Anual	INEGI	Población sin acceso al agua potable
2 (E2)	Distancia a las fuentes de abastecimiento	Distancia que recorren los habitantes para poder satisfacer sus necesidades básicas	Km	Mensual	Encuestas en la localidad	Trayecto a los cuerpos de agua
3 (E3)	Escurrimiento medio anual	Cantidad de escurrimiento en la localidad	CI/m3	Anual	CONABIO	Escurrimiento
4 (E4)	Demanda de agua per cápita	Litros de agua que consume una persona	L/Persona	Anual	INEGI	Demanda de agua potable
5 (E5)	Precipitación media anual	Cantidad en milímetros de lluvia	mm	Anual	INEGI / CONABIO	Lluvia
6 (E6)	Calidad del agua de las fuentes de abastecimiento	Mediante bioindicadores se cuantifican e identifican organismos que califican la calidad del agua	Muy mala, mala, media, buena, excelente	Anual		Contaminación del agua
Presión						
7 (P1)	Recursos financieros destinados para obras hidráulicas y ambientales	Cantidad de los recursos financieros para implementación de obras hidráulicas	$	Anual	Municipio	Dinero destinado a obras hidráulicas y ambientales
8 (P2)	Uso de fertilizantes y pesticidas	Cantidad de fertilizantes usados en la agricultura	Kg /km2	Anual	Encuestas en la localidad	Empleo de fertilizantes y pesticidas
9 (P3)	Cobertura de drenaje	Viviendas con servicio de drenaje	%	Anual	INEGI	Viviendas sin drenaje
10 (P4)	Deforestación	Destrucción de la superficie forestal de un terreno	Hectáreas	Anual	Destrucción de la superficie de árboles en zonas altas	
Impacto						
11 (I1)	Caudal anual medio	Cantidad de caudal en manantiales y arroyos	l/s	Anual	Municipio	Afectación en caudales
12 (I2)	Uso de suelo	Modificación de la cobertura de la superficie a través del tiempo	%	Anual	INEGI	Cambio de uso de suelo
13 (I3)	Humedad en el suelo / sequía	Cantidad de agua dada en el suelo	%	Anual	INEGI	Suelos secos en época de estiaje (sequía)
14 (I4)	Morbilidad de origen hídrico	Numero de enfermedades causadas por el agua	%	Anual	Encuestas en la localidad	Enfermedades causadas por el agua contaminada
Respuesta						
15 (R1)	Programas alternativos para el abastecimiento de agua	Número de programas planeados para abastecimiento	No. De programas ejecutados.	Anual		Programas para tener agua
16 (R2)	Programas alternativos para el vertimiento de aguas residuales	Programas para implementar drenaje en la localidad	No. De programas implementados	Anual		Programas para el desecho de aguas residuales
17 (R3)	Emplear personal capacitado en obras hidráulicas	Número de personal capacitado	Personal capacitado en puestos que le corresponden / Personal capacitado en puestos que no le corresponden	Anual		Personal experto en obras hidráulicas
18 (R4)	Reforestación	Método que consiste en plantar árboles	No. De árboles sembrados	Semestral		Sembrar más árboles en la localidad
AEPA 2 Desarrollo Social e Institucional						
No. de indicador	**Indicador**	**Descripción**	**Unidad**	**Tiempo**	**¿Cómo o de donde se obtiene?**	**¿A qué condición corresponde del árbol de problemas?**
Estado						
19 (E1)	Densidad de la población	Distribución de la población en la localidad	Habitantes/2	Anual	INEGI	Población dispersa
20 (E2)	Índice de marginación	Estado socio-económico de la población (educación, vivienda, distribución, ingresos)	%	Anual	CONABIO	Rezago de la población
21 (E3)	Índice de desigualdad de género	Número de mujeres que abastecen de agua a su familia	No.	Anual	INEGI	Las mujeres son las que abastecen de agua a la familia
Presión						
22 (P1)	Crecimiento demográfico	Cambio de la población en la cantidad de habitante	No. habitantes	Anual	INEGI	Aumento de la población
23 (P2)	Interés social e institucional	Valor que la localidad y el gobierno municipal le proporciona al agua	Muy bajo, bajo, medio, alto.	Anual	Encuestas en la localidad	Desinterés social e institucional (ambiental, social, económico)
24 (P4)	Obras de agua potable y saneamiento	Número de obras para el agua potable y saneamiento	No. De obras	Anual	Municipio	Afectación con el número de obras de agua y saneamiento
Impacto						
25 (I1)	Conflictos sociales	Número de demandas o quejas por el agua	No.	Anual	Municipio	Conflictos en la población
26 (I2)	Migración	Cambio de residencia para establecerse en otro país, municipio, región	%	Anual	INEGI	Cambio de hogares a otros estados o países
27 (I3)	Calidad de vida	Carencia de servicios básicos	Muy bajo, bajo, medio, alto	Anual	Encuestas en la localidad	Afectación en la calidad de vida
Respuesta						
28 (R1)	Cursos de capacitación GIRH	Número de cursos de capacitación GIRH	No. De cursos	Anual	Municipio	Cursos de gestión del agua
29 (R2)	Red de consulta	Red para resolver, consultar, dudas, sugerencias y responder encuestas	No. De visitas	Anual	Municipio	Tener una red de consulta
30 (R3)	Cursos de capacitación para ayuntamiento y la población acerca del uso racional de agua	Número de cursos de concientización sobre el uso racional del agua	No. De cursos	Anual	Municipio	Capacitación del uso racional del agua

Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Matriz de evaluación de indicadores obtenida por el equipo de trabajo

		AEPA: Hidrología y Ecología																				AEPA: Desarrollo Social e Institucional															Suma de Vínculos	Selección de indicador	Jerarquía	Peso
		E1	E2	E3	E4	E5	E6	P1	P2	P3	P4	I1	I2	I3	I4	R1	R2	R3	R4	E1	E2	E3	P1	P2	P3	I1	I2	I3	R1	R2	R3				
AEPA: Hidrología y Ecología	E1		1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	12	*	1°	1
	E2	1		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0	0	7			
	E3	1	0		1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5			
	E4	1	0	0		1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	11	*	2°	1
	E5	1	1	1	1		0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	7			
	E6	0	0	0	0	0		1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	10			
	P1	1	1	0	1	0	1		0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	11	*	2°	1
	P2	0	0	0	0	0	0	1	1		0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	5			
	P3	0	0	0	0	0	1	1	0		0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	10	*	3°	1
	P4	1	0	1	1	0	0	1	0	0		0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	8			
	I1	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1		0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	8	*	5°	0.5
	I2	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0		0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	4			
	I3	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	1	0		0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	9	*	4°	1
	I4	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0		0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	9			
	R1	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0		0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	9	*	4°	1
	R2	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0		1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	10	*	3°	1
	R3	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1		0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	9			
	R4	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0		0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	7			
AEPA: Desarrollo Social e Institucional	E1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	3	*	6°	0.5
	E2	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0		0	1	0	1	1	0	1	0	0	0	10	*	3°	1
	E3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	1	0	1	0	1	0	0	0	3			
	P1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0		0	0	1	0	1	0	0	0	8			
	P2	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0		1	1	0	1	1	0	1	12	*	1°	1
	P3	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1		1	0	1	0	0	0	12	*	1°	1
	I1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0		0	1	0	0	0	3	*	6°	0.5
	I2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0			
	I3	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0		0	0	0	9	*	4°	1
	R1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	1		0	0	10	*	3°	1
	R2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0		0	2			
	R3	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0		5	*	6°	0.5
Peso para 16 indicadores seleccionados: 1.00 para jerarquías del 1°-4°; 0.50 para 5°-8°; 0.25 para 9°-12° y 0.125 para 13°-16°																																			

Fuente: elaboración propia.

d) Fase de Estrategias

En la Sesión 1. Segundo Taller, se definen las estrategias y selección de las dos mejores para la solución de la problemática de suministro de agua en la localidad La Campanilla, municipio de Villa Victoria.

Definición de estrategias: se reconoce la importancia de redactar las estrategias en forma clara, apropiada, aceptable y factible para su comprensión por los integrantes del equipo de trabajo. Por consenso, se propusieron dos estrategias para cada AEPA, tal como se enuncian a continuación:

Estrategias de la AEPA Hidrología y Ecología:

1. Asegurar el abastecimiento de agua potable en la localidad La Campanilla, municipio de Villa Victoria del Estado de México.
2. Ampliar la cobertura de drenaje y mejorar el saneamiento básico del agua en la localidad.

Estrategias de la AEPA Desarrollo social e institucional:

1. Fortalecer las capacidades institucionales para un desarrollo rural, enfocado en la igualdad de género y derechos humanos.

2. Implementar programas de educación ambiental para fomentar el uso racional del agua potable.

Selección de estrategias: la aplicación de la herramienta para evaluación de estrategias, eligió observar de manera precisa cuáles indicadores estaban más relacionados en cada una de éstas. Se asignó el peso de cada indicador seleccionado del sistema PEIR y, eligió las dos estrategias con la mayor suma de pesos de indicadores. Como se observa en la Figura 7, las estrategias que resultaron prioritarias para poder ejecutarse fueron 1° y 2° que considera asegurar el abastecimiento de agua (con suma total de indicadores que intervienen de 9.0), así como ampliar la cobertura de drenaje y mejorar el saneamiento del agua, con un total de 7.5 como suma de pesos de indicadores relacionados con la estrategia. Sin embargo, las estrategias 3 y 4 el equipo de trabajo coincidió en que es necesario darle solución inmediata al desabasto de agua a la comunidad para fortalecer las capacidades institucionales e implementar programas de educación ambiental.

Figura 7. Evaluación de estrategias

Estrategia 1. Asegurar el abastecimiento de agua potable en la localidad La Campanilla en Villa Victoria, Estado de México.						
AEPA	Desarrollo social e institucional			Hidrología y ecología		
PEIR	Indicador	Interviene	Peso	Indicador	Interviene	Peso
Estado	E1	Si	1	E1	Si	0.5
	E2	Si	1	E4	Si	1
Presión	P2	Si	1	P1	Si	1
	P3	Si	1	P3		
Impacto	I1	Si	0.5	I1		
	I3	Si	1	I3		
Respuesta	R1			R1	Si	1
	R3			R2		
Peso total	9.00					

Estrategia 2. Ampliar la cobertura de drenaje y mejorar el saneamiento básico del agua en la localidad.						
AEPA	Desarrollo social e institucional			Hidrología y ecología		
PEIR	Indicador	Interviene	Peso	Indicador	Interviene	Peso
Estado	E1			E1		
	E2	Si	1	E4		
Presión	P2	Si	1	P1	Si	1
	P3	Si	1	P3	Si	1
Impacto	I1	Si	0.5	I1	Si	0.5
	I3	Si	1	I3		
Respuesta	R1			R1		
	R3			R2	Si	0.5
Peso total	7.50					

Estrategia 3. Fortalecer las capacidades institucionales para un desarrollo rural, enfocado en la igualdad de género y derechos humanos.						
AEPA	Desarrollo social e institucional			Hidrología y ecología		
PEIR	Indicador	Interviene	Peso	Indicador	Interviene	Peso
Estado	E1			E1		
	E2			E4		
Presión	P2	Si	1	P1		
	P3			P3		
Impacto	I1	Si	0.5	I1		
	I3	Si	1	I3		
Respuesta	R1	Si	1	R1	Si	1
	R3	Si	1	R2	Si	0.5
Peso total	6.00					

Estrategia 4. Implementar programas de educación ambiental para fomentar el uso racional del agua potable.						
AEPA	Desarrollo social e institucional			Hidrología y ecología		
PEIR	Indicador	Interviene	Peso	Indicador	Interviene	Peso
Estado	E1	Si	1	E1		
	E2			E4		
Presión	P2	Si	1	P1		
	P3			P3		
Impacto	I1	Si	0.5	I1		
	I3	Si	1	I3		
Respuesta	R1	Si	1	R1	Si	1
	R3	Si	1	R2	Si	0.5
Peso total	7.00					

Fuente: elaboración propia.

e) Fase del Plan GIRH

La última fase de la planeación se llevó a cabo en la Sesión 1 del Taller 3 de las instalaciones del municipio de Villa Victoria.

Programas, proyectos y acciones: fue un proceso de dificultad para los integrantes del equipo de trabajo, el desglose de las estrategias seleccionadas en programas; proyectos y acciones coadyuvantes para lograr la seguridad hídrica, aunado al desarrollo sustentable en la localidad La Campanilla. Sin embargo, se reconoce el esfuerzo y compromiso de los que toman las decisiones en el municipio de Villa Victoria para establecer por consenso las actividades en dos estrategias seleccionadas. En la Figura 8 se muestran las actividades de índole analítico y de implementación para la estrategia 1, que consistía en el aseguramiento de abastecimiento de agua potable. Específicamente, se propuso un programa de suministro alternativo capaz de suplir la demanda del recurso hídrico como el aprovechamiento del agua de lluvia. El proyecto prioritario se enfocó en establecer las acciones de la construcción de canaletas pluviales en las techumbres de las casas de la localidad La Campanilla. Para el caso de la estrategia 2, donde se propuso ampliar la cobertura de drenaje y mejorar el saneamiento del agua, el equipo trabajó la importancia de establecer medidas alternativas para mejorar la forma de vertidos de agua residual mediante el uso de sanitarios ecológicos secos y bio-filtros, como proyectos prioritarios (Figura 8).

De manera específica, las acciones consensuadas para la estrategia 1, en general consistieron en analizar en campo las viviendas que cuenten con la infraestructura adecuada de techos para captación de agua de lluvia y determinar las características de diseño requeridas para los diferentes componentes hidráulicos del almacenamiento de agua (de acuerdo con las condiciones meteorológicas de la región). Por otra parte, las acciones que se plantearon para el desarrollo de la estrategia 2, estuvieron enfocadas principalmente en realizar recorridos en campo para determinar cuáles viviendas pudieran cumplir los requisitos de diseño de los sanitarios ecológicos, así como determinar las dimensiones de los componentes de los sanitarios y la capacitación a los usuarios de esta alternativa de drenaje. Asimismo, las acciones enfocadas en la implementación de bio-filtros como medida alterativa del saneamiento del agua, se propuso determinar las características de los filtros y la instrucción de su uso a los habitantes de la localidad.

Figura 8. Programas, proyectos y acciones del Plan GIRH

AEPA. Hidrología y Ecología

Estrategia 1. Asegurar el abastecimiento de agua potable de la localidad La Campanilla en el municipio de Villa Victoria en el Estado de México		**Institución**	**Rol / Participación**
Programa	**Abastecimiento de agua potable a través de un sistema colector de agua pluvial**		Líder de proyecto
Proyecto	**Construcción de canaleta en los techos que conducen el agua pluvial a una cisterna.**	Gobierno Federal	Asignar presupuesto
	1. Describir y tener en cuenta las características generales y aspectos con los que deberá contar el sistema de captación de agua de lluvia		Cumplir normatividad
	2. Realizar un levantamiento de campo donde se determinen los hogares que desean adquirir la tecnología para el sistema de agua potable	Municipio	Coordinador, supervisor, ejecutor
	3. Calcular el consumo de agua para la vivienda (50 mínimo y 100 máximo l/hab/día)		Administrador de recursos
	4. Determinar el volumen de captación viable de aprovechar en la vivienda (para garantizar la dotación que será establecida)	Facilitadores UAEMex	Asesorar
Acciones	5. Monitoreo de la precipitación media anual la cual deberá ser igual o mayor a los 1500 mm para garantizar el abastecimiento durante todo el año.	Población de localidad	Comunicadores
	6. Cumplir con los elementos que componen el sistema de captación de agua pluvial, cabe señalar que los componentes principales son (área de captación, canaletas, conducción, filtro y deposito o tanque de almacenamiento)	CAEM	Dirigir recursos para obras hídricas Cumplir normatividad
	7. Determinar los materiales necesarios para la captación y conducción.	CONAGUA	Evaluar y asesorar proyectos
	8. Supervisar que las casas cuenten con los materiales y elementos necesarios para la captación y conducción.	ONG	Supervisa y financia proyectos

Estrategia 2. Ampliar la cobertura de drenaje y mejorar el saneamiento básico del agua en la localidad		**Institución**	**Rol / Participación**
Programa 1	**Programa de ampliación de cobertura de drenaje**		
Proyecto 1	**Establecimiento de una red de drenaje en la localidad a través de sanitarios ecológicos secos**		Líder de proyecto
	9. Elaboración de análisis y estudios de la localidad que ayuden observar que características deben de tener las viviendas de la localidad para implementar los sanitarios ecológicos secos, como vegetación, estructura, techo, cimientos, etc.		
	10. Realizar un levantamiento de campo donde se determinen los hogares que desean adquirir la tecnología para los sanitarios ecológicos secos.	Municipio	Coordinador, supervisor, ejecutor
	11. Dar instrucciones a la población de cómo usar y dar mantenimiento adecuado para el sanitario ecológico, mediante talleres de capacitación.		Asignar presupuesto
Acciones	12. Cumplir con los componentes del baño ecológico que son: cámaras de secado (donde se depositan las heces hasta transformarse en abono natural), mezcla secante (combinación de tierra y ceniza para cubrir las heces), tubo de ventilación (tubo de 4 pulgadas para evitar malos olores), urinario (para comodidad de los varones y evitar que ingresen líquidos a la cámara compostura), recolector de orina (bidón u otro recipiente para almacenarla para usarla como fertilizante natural)		Administrador de recursos
	13. Implementar y evaluar las construcciones de los baños ecológicos secos de la localidad.	Facilitadores UAEMex	Asesorar
Programa 2	**Programa para el saneamiento básico del agua a través de bio-filtros**	Población de localidad	Comunicadores
Proyecto 2	**Alternativa para la reutilización de las aguas grises (agua jabonosa de lavaderos y regaderas) a través de un proceso lento filtrado por plantas, arenas y cierto tipo de rocas**	CONAGUA	Concesiones y permisos
	14. Dar instrucciones a la población de cómo usar y dar mantenimiento adecuado para los bio – filtros, mediante talleres de capacitación.	CAEM	Convoca a obras públicas
	15. Determinar y conocer perfectamente los elementos y características de los bio-filtros: los cuales son:		Opera red de alcantarillado
Acciones	a) Tratamiento primario (trampa de grasas, donde son retenidos los sólidos y las grasas) b) Construcción del bio- filtro c) Recubrimiento del bio- filtro (arcilla, graba) d) Tuberías de instalación e) Llenado de los bio-filtros	Organismo operador del agua municipal	Opera y mantiene la red de drenaje

Fuente: elaboración propia.

Definición de roles: en la Figura 8 también se muestra el nivel de participación del gobierno federal, estatal y municipal como de la parte académica y de los habitantes para coadyuvar en conjunto, la solución de la problemática del abastecimiento de agua en la localidad La Campanilla. Se resalta el nivel de compromiso con las autoridades federales (CONAGUA); únicamente como proveedores de información, asesores y supervisores del cumplimiento de la normatividad y, en algunos casos, agentes que conceden de recursos financieros en el ámbito hídrico. Por otra parte, las instituciones estatales (CAEM) tendrían responsabilidades de dirección de obras públicas, cumplimiento de normas y operantes de recursos financieros para obras hídricas; sin embargo la mayor responsabilidad de participación en el proyecto de esta propuesta del Plan GIRH, es para los diversos responsables de cargos públicos del municipio de Villa Victoria que tienen roles de supervisores, ejecutores, administradores, coordinadores, comunicadores y operadores de las acciones

para solucionar el problema de abastecimiento de agua en la localidad La Campanilla. La parte académica de la sociedad (la Universidad Autónoma del Estado de México) presenta una participación de facilitador o de asesor en todas las etapas del proceso GIRH. Finalmente, se propone que los habitantes locales deben comprometerse con la apertura y aceptación de la utilización de medidas alternativas para subsanar el déficit de calidad y cantidad del recurso hídrico en la región.

Conclusiones

Frente a la problemática hídrica de la localidad La Campanilla, es necesario el compromiso conjunto del personal del municipio de Villa Victoria, de los habitantes locales y de un facilitador que ayudará en la asesoría de implementación de un proceso GIRH. El proceso se nutrió en todas sus fases, del conocimiento intuitivo de la sociedad, la experiencia del personal de gobierno municipal y la sugerencia de orden en la planeación de las actividades en los Talleres por parte del facilitador de la Universidad Autónoma del Estado de México. Sin el apoyo de alguna de estas partes, no hubiese sido posible obtener el Plan de trabajo para promover el abastecimiento de agua en la zona de estudio, ya que algunas de las partes de este proceso hubieran sido parciales, incompletas o ineficientes.

Se destaca la importancia de los talleres realizados para la obtención concreta de resultados en cada una de las fases para el manejo adecuado del agua en la región. El grupo de trabajo mostró buena disposición para realizarlos en las instalaciones municipales, y aunque requirió del tiempo valioso para las tareas que desempeñaban diariamente, lo cierto es que hubo compromiso para que la propuesta del Plan GIRH tuviera suficientes argumentos técnicos para su implementación en el mediano plazo.

Derivado de las opiniones generales del grupo de trabajo, se coincide en que las estrategias propuestas coadyuvarán en mejorar la calidad de vida de los habitantes de la localidad La Campanilla, Villa Victoria, Estado de México. A través de los recolectores de agua de lluvia, los habitantes de dicha localidad tendrán agua limpia y segura, además, no tendrán que caminar de uno a tres kilómetros para abastecerse del recurso vital. Asimismo, con el uso de sanitarios ecológicos secos y bio-filtros, el agua de residual que no se colecta en drenajes municipales no afectará la vida de los habitantes y mejorará su salud de manera directa. De igual modo, al atender las estrategias planteadas de este Plan GIRH, podrán mejorarse de forma directa los indicadores de índice de marginación, conflictos sociales, calidad de vida, morbilidad de origen hídrico, y demanda de agua per cápita, que son los más críticos en la región.

Debido a las condiciones globales de variabilidad climática y carencia de recursos financieros, es necesaria la adopción y uso de procesos alternativos para abastecimiento de agua y saneamiento. Con la presente propuesta de un

Plan GIRH, se propusieron acciones que contribuirán a que la localidad La Campanilla se vea favorecida con una mayor calidad de vida a nivel social, económico, hidrológico, ambiental y físico, aunado al uso sustentable de los recursos naturales y financieros de la región. Cabe destacar que el proceso de implementación de un Plan GIRH resulta exitoso si existe voluntad política y compromiso por parte de todos los sectores de la sociedad, como son el sector gubernamental, académico y social.

Bibliografía

Carabias, J., Landa, R., Collado, J., y Martínez, P. (2005). *Agua, medio ambiente y sociedad. Hacia la gestión integral de los recursos hídricos en México* (UNAM, El Colegio de México A. C., y Fundación Río Arronte I. A. P., Eds.; 1a.). https://www.bibliotecavirtualrs.com/recursos/agua_medio_ambiente_y_sociedad.pdf

CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Toluca (1501), Estado de México.* Comisión Nacional del Agua. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103132/DR_1501.pdf

Cota, A. (2002). *La importancia de los valores en el desarrollo humano de la organización.* Universidad Autónoma de Nuevo León. http://eprints.uanl.mx/1001/1/1020147482.PDF

Demant, A. (1978). Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. Univ. Nal. Autón. México, Inst. *Geología, Revista, 2*(2), 172–187.

Díaz-Delgado, C., Esteller, M. V., Velasco, A., Martínez, J., Arriaga, C., Vilchis-Francés, A. Y., Manzano-Solís, L. R., Colín-Mercado, M., Miranda-Juárez, S., Uribe-Caballero, W., y Peña, A. (2009). *Guía de planeación estratégica participativa para la gestión integrada de los recursos hídricos de la cuenca Lerma-Chapala-Santiago, Capítulo Estado de México.* Dirección de Difusión y Promoción de la Investigación y Estudios Avanzados, Ed.; 1a.. Universidad Autónoma del Estado de México.

Domínguez, J. (2011). Hacia una buena gobernanza para la gestión integrada de los recursos hídricos Documento temático de las Américas. En *VI World Water Forum.* http://www.oas.org/en/sedi/dsd/iwrm/past events/D7/6 WWF-GOBERNANZA Final.pdf

Estrella, M. V., y González, A. (2014). *Desarrollo sustentable: un nuevo mañana (1a.).* Grupo Editorial Patria. https://www.editorialpatria.com.mx/pdffiles/9786074386608.pdf

GRAVM (2005). *Sistema Cutzamala Agua para millones de mexicanos*. Gerencia Regional de Aguas del Valle de México.

INEGI (2017). *Conociendo el Estado de México 7a. edición*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. www.inegi.org.mx

INEGI (2022). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. https://www.inegi.org.mx/

app/areasgeograficas/?ag=15#collapse-Resumen

Morrisey, G. L. (1996a). *Pensamiento Estratégico. Construya los cimientos de su planeación (1a.).* Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A.

Morrisey, G. L. (1996b). *Planeación a largo plazo. Creando su propia estrategia (1a.).* Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A.

Morrisey, G. L. (1996c). *Planeación a corto plazo. Produciendo resultados en corto plazo (1a.).* Prentice-Hall Hispanoamericana, S. A.

MVV (2003). *Plan Nacional de Desarrollo Urbano Municipal. Municipio de Villa Victoria.* http://seduv.edomexico.gob.mx/planes_municipales/Villa Victoria/doc-villa victoria03.pdf

MVV (2016). *Plan Nacional de Desarrollo Municipal 2016-2018. H. Ayuntamiento de Villa Victoria, Estado de México*. http://villavictoria.edomex.gob.mx/sites/villavictoria.edomex.gob.mx/files/files/acerca del ayuntamiento/Normateca Municipal/GACETA NO_ 4 PLAN DE DESARROLLO MUNICIPAL.pdf

Rolland, L., y Cárdenas, Y. V. (2010). La gestión del agua en México. *Polis, 6*(2), 155–188. https://www.redalyc.org/pdf/726/72618890006.pdf

Santacruz, G. (2007). *Hacia una gestión integral de los recursos hídricos en la cuenca del Río Valles, Huasteca, México*. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

SMA. (2007). *Diagnóstico Ambiental del Estado de México por Regiones Hidrográficas* (Secretaría del Medio Ambiente, Ed.; 1a ed.). Gobierno del Estado de México. http://sma.edomex.gob.mx/sites/sma.edomex.gob.mx/files/files/sma_pdf_da_em_2007.pdf

Valencia, J. C., Díaz, J. J., y Vargas, L. (2007). La gestión integrada de los recursos hídricos en México: un nuevo paradigma en el manejo del agua. *El Manejo Integral de Cuencas en México*, 2, 213–258.

Capítulo 14. La influencia de El Niño-Oscilación del Sur en los eventos hidrometeorológicos extremos: caso Tabasco

Alejandro Jaramillo Moreno [1]
Carla Sabrina Vázquez Jiménez [2]
Christian Domínguez Sarmiento [3]
Leodegario Sansón Reyes [4]

Introducción

La variabilidad climática se define como la variación estacional o anual del clima; es decir, existen variaciones de temperatura y precipitación en invierno o verano, inducidas por cambios en los vientos y las temperaturas de la superficie del mar (Van Der Wiel y Bintanja, 2021). La variabilidad climática existe debido a las oscilaciones climáticas que pueden inducir cambios en el clima, como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS). Este modo de variabilidad natural ocurre de 3 a 7 años y se divide en tres fases de acuerdo con las anomalías en la temperatura de la superficie del mar (TSM) del Océano Pacífico ecuatorial: El Niño (anomalías positivas en la TSM, fase cálida), Neutro (sin anomalías en la TSM), La Niña (anomalías negativas en la TSM, fase fría) (Philander y Rasmusson, 1985).

1 Doctor en Ingeniería-Recursos Hidráulicos. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México.

2 Licenciada en Ingeniería Geofísica. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Ticomán, Instituto Politécnico Nacional.

3 Doctor en Ciencias de la Tierra. Instituto de Ciencias de la Atmósfera y Cambio Climático, Universidad Nacional Autónoma de México.

4 Licenciado en Física y Matemáticas. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Unidad Ticomán, Instituto Politécnico Nacional.

Los cambios estacionales en la temperatura y precipitación son producidos por variaciones en el comportamiento de los fenómenos meteorológicos afectando a México Esta variación es modulada por las fases del ENOS. Por ejemplo, los frentes fríos, fenómenos meteorológicos que ocurren desde septiembre hasta mayo son responsables de transportar frío y humedad desde Canadá hasta el sur de México. Durante un año La Niña existen pocos frentes fríos en comparación con el número que regularmente se tiene; es decir, menor al promedio histórico de 30 años (lo normal). En consecuencia, el invierno se caracteriza por ser más caliente y seco que lo normal. Durante años El Niño presenta más frentes fríos que en promedio y, por lo tanto, los inviernos se caracterizan por ser más fríos y húmedos (Magaña *et al.*, 2003). Durante el verano, los fenómenos meteorológicos que afectan a México son principalmente en la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT); las ondas del este y los ciclones tropicales. En años anteriores La Niña como actividad de los ciclones tropicales, aumenta principalmente en el Golfo de México y Mar Caribe, lo mismo, las ondas del este a la región centro-sur del país. Estos cambios se traducen en aumento de lluvias pues durante años, El Niño, presenta lo contrario, se esperan menos ciclones tropicales y ondas del este en promedio, por lo tanto, llueve menos a diferencia de otros años (Dominguez *et al*., 2021).

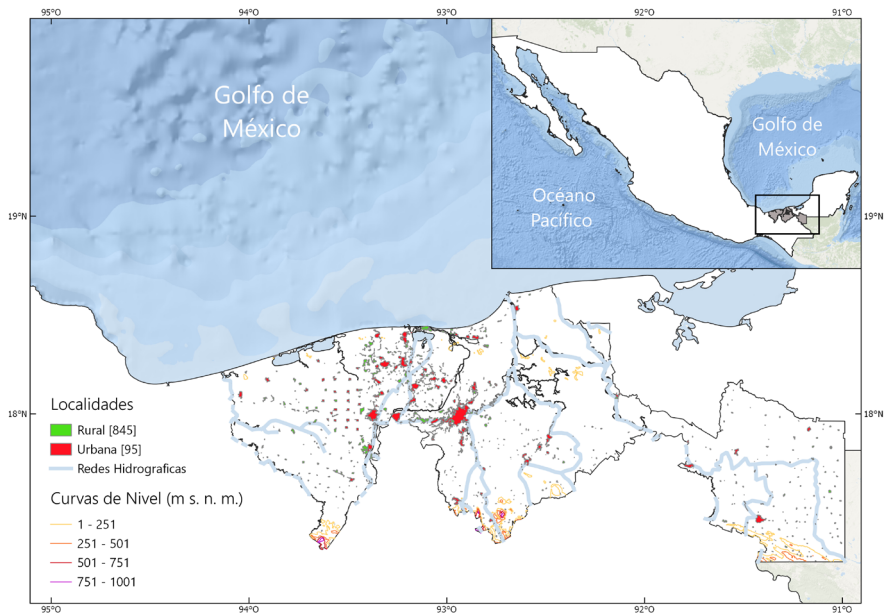
Es interesante mencionar que estos cambios en la temperatura y la lluvia también se pueden traducir en cambios en el comportamiento de sus extremos. Durante veranos El Niño presenta una disminución en el número de días de eventos extremos de lluvia definidos por el percentil 95 (P95) en el país. Por el contrario, La Niña en veranos, incrementa el número de días de precipitación P95 en el país (Dominguez *et al*., 2021). Los eventos extremos de lluvia se pueden considerar como una amenaza hidrometeorológica, ya que son sucesos naturales que producen pérdidas en la infraestructura, la vida humana y el funcionamiento de la sociedad o comunidad (UNISDR, 2017). Las fases del ENOS modulan la cantidad de los eventos extremos de lluvia que se presentan en el país, aunado a una alta vulnerabilidad social calculada en términos del grado de marginación y rezago social que tienen una señal en la ocurrencia de los desastres (Dominguez *et al.,* 2021). Lo anterior quiere decir que el país es vulnerable como los incrementos/decrementos en las amenazas grandemente relacionados con el aumento/disminución de los desastres. Los desastres no son naturales, pero la alta vulnerabilidad del país hace que los cambios en las amenazas se traduzcan en cambios de frecuencia en los desastres.

Tabasco es la zona del país en donde se registra la mayor precipitación pluvial generando grandes excedentes que ocasionan problemas, pues en algunas áreas se carece de la infraestructura adecuada para drenarlos (INEGI, 2001). Por lo tanto, este estado ha sido históricamente afectado por inundaciones prolongadas; ejemplo de ello son las inundaciones de Tabasco ocurridas

en el 2007, causando pérdidas económicas de alrededor de 1,732 millones de dólares (Zapata-Martí y Arróliga, 2008).

El estado de Tabasco se encuentra localizado al sureste de la República Mexicana, entre las coordenadas 17°19'00'' y 18°39'00'', latitud norte 90°57'00 y 94°08'00'' de longitud oeste (Figura 1); cuenta con una extensión de 24,730.49 km^2 equivalente al 1.3% del territorio nacional (Palma-López *et al.*, 2007). Limita al norte con el Golfo de México, al sur con el estado de Chiapas, al noroeste con el estado de Campeche y al sureste con la república de Guatemala. Tabasco ocupa el lugar 20 a nivel nacional por su número de habitantes, con una tasa de crecimiento demográfico que ha tenido un aumento considerable desde 1960 a 2020, pasando de 0.5 a 2.4 millones de habitantes en ese período (INEGI, s.f.).

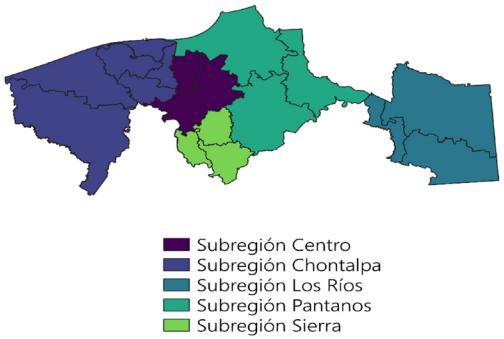
Figura 1. Localización geográfica del estado de Tabasco



Fuente: elaboración propia.

El territorio tabasqueño se divide en 5 regiones productivas compuestas por 17 municipios (Figura 2) (Gobierno de Tabasco, s.f.). En cuanto a su topografía, se ve dominado por extensas llanuras bajas, depresiones pantanosas e inundables, interrumpidas por algunos lomeríos y sierras que se presentan en sus fronteras al sur (Galindo *et al.*, 2015).

Figura 2. Subregiones y municipios del estado de Tabasco



Subregión	Municipios
Centro	Centro
	Nacajuca
	Jalpa de Méndez
Chontalpa	Huimanguillo
	Cárdenas
	Comalcalco
	Paraíso
	Cunduacán
Sierra	Teapa
	Jalapa
	Tacotalpa
Pantanos	Centla
	Jonuta
	Macuspana
Los Ríos	Emiliano Zapata
	Balancán
	Tenosique

Fuente: elaboración propia.

En este capítulo, se explorará cómo la lluvia acumulada, los eventos extremos de lluvia definidos por el P95 y las declaratorias de emergencia cambian en cada fase del ENOS en los municipios de los estados de Tabasco. Por ello, es importante analizar las amenazas y los desastres ocurridos a un nivel municipal, ya que esta información podría servir para planear acciones preventivas y enfocarse en los municipios que han sido más afectados históricamente por lluvias extremas.

1. Precipitación y clasificación de años ENOS

Para estudiar la influencia del ENOS en la precipitación, se usa la precipitación acumulada diaria proveniente de la base de datos de "Precipitación Infrarroja con Estaciones del grupo de Riesgo Climático" (CHIRPS, por sus siglas en inglés). Esta base de datos usa tanto información satelital como datos provenientes de pluviómetros. CHIRPS contiene datos desde 1981 hasta el presente, con una cobertura cuasi-global (50°S-50°N), alta resolución espacial (0.05°), que genera datos diarios, pentadales y mensuales (Funk *et al.*, 2015).

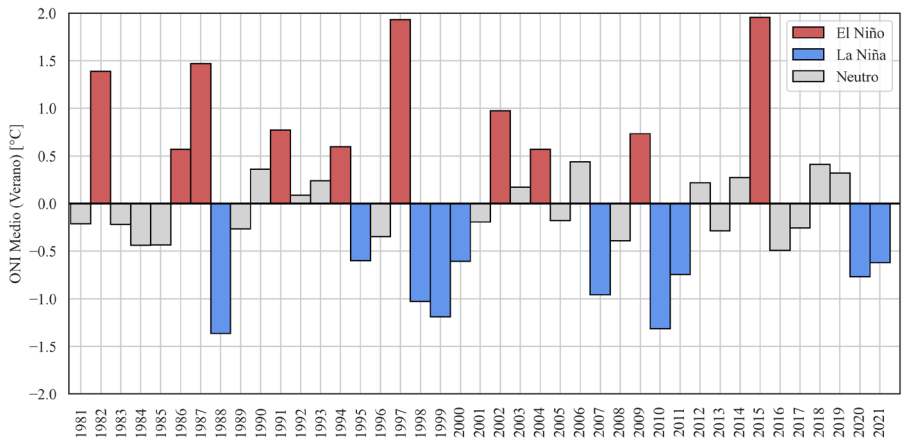
Funk *et al*. (2015) señala que CHIRPS presenta un alto grado de correlación con los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas, aunque puede presentar subestimaciones en ciertas regiones (Funk *et al*., 2015). La principal ventaja de CHIRPS en este trabajo es brindar información, robusta y confiable, de continuidad espacial y temporal. Adicionalmente, Perdigón-Morales *et al.* (2019) mencionan que CHIRPS tiene estimaciones correctas de duración

e intensidad de precipitación para México, así como indicadores de sequía de medio verano.

Para realizar una clasificación de los años en función de la fase del ENOS, usaremos el índice oceánico de El Niño (ONI) creado por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA, por sus siglas en inglés). ONI es índice que ayuda a clasificar la fase del ENOS, basándose en las anomalías de la TSM (Huang *et al*., 2016); se define como la media móvil de tres meses sobre las anomalías de la TSM en la región del océano Pacífico, conocida como región Niño 3.4 (5°S-5°N, 120°-170°W). Esta información se encuentra disponible en la página web del Centro de Predicción Climático de la NOAA (Huang *et al.*, 2016). En general, se considera como la fase ENOS de valor ONI ≥ 0.5°C para El Niño, o ≤ -0.5 °C para La Niña; caso contrario, se consideran condiciones Neutras (Glantz y Ramirez, 2020).

La información descargada de ONI empieza en mayo de 1981 y termina en noviembre del 2021, lo que corresponde al período de datos disponibles de CHIRPS. Para definir la fase dominante del ENOS en un año en particular, se promediaron los valores del índice ONI durante el trimestre mayo-junio-julio hasta el trimestre octubre-noviembre-diciembre, que corresponde a la temporada de lluvias para Tabasco. El período de lluvias empieza en junio y termina en noviembre; es decir, durante este período ocurren la mayoría de los eventos extremos de precipitación en la región.

Figura 3. Clasificación de los años 1981 a 2021 de acuerdo a su fase ENOS durante el período de lluvias (junio a noviembre)



Fuente: elaboración propia.

La figura 3 muestra la clasificación de los años de acuerdo con la fase del ENOS. Las barras rojas representan los años dominados por la fase El Niño, las barras azules representan los años La Niña y mientras el gris los años Neutros. La altura de las barras indica el valor promedio del ONI para el período de junio a noviembre.

2. Historia de los eventos extremos en Tabasco

Tabasco es históricamente zona potencial de inundaciones debido a sus características fisiográficas e hidrológicas. De acuerdo con Aguilar Palafox (2019), la primera inundación documentada en las memorias de los cronistas españoles ocurrió en 1579. Por su parte, la inundación de 1782 fue conocida como "El Diluvio de Santa Rosa" debido a su magnitud y daños causados (Aguilar Palafox, 2019).

Con el aumento de la población en los últimos 41 años, las inundaciones tienen un mayor potencial de devastación. El aumento en los impactos puede ser producidas por cualquier fenómeno hidrometeorológico, no sólo al aumento en la cantidad de lluvia; también al aumento del deterioro de cuencas hidrográficas, la deforestación de áreas naturales y la degradación ambiental. Este deterioro induce que las comunidades sean más vulnerables física y socialmente a las lluvias intensas (Oliver-Smith *et al.*, 2017; Alcántara-Ayala, 2019).

El período de estudio entre 1981 y 2021 destacan los eventos extremos de precipitación ocurridos en 1995, 1999, 2007, 2008, 2010, 2013 y 2020. Estos eventos son relevantes debido a la intensidad de las lluvias, zonas afectadas, pérdidas humanas y económicas. El cuadro 1 muestra un registro de los fenómenos que causaron estos eventos, así como el período, los municipios afectados, algunos de los daños causados, la cantidad aproximada de las pérdidas económicas y la fase del ENOS correspondiente.

Para construir el cuadro 1, se usó información de los fenómenos meteorológicos del compendio "Ciclones Tropicales que impactaron en México, período 1980-2020" y "Frentes fríos y eventos de Norte en el Golfo de México, en el período 2003 -2022 proporcionado por el Servicio Meteorológico Nacional. Para el año 1999, se trabajó la información proveniente de Abreu-Lastra y Gutiérrez (2009). Los municipios afectados, los daños causados y las pérdidas económicas fueron datos recolectados por diversas fuentes de información como noticias, informes, libros y declaratorias de emergencia del Diario Oficial de la Federación.

Es interesante mencionar que los eventos más costosos ocurrieron en años La Niña. Estos eventos están asociados a ciclones tropicales, ondas y frentes fríos, que ocurrieron principalmente en los meses de septiembre y octubre (más activos durante esta fase fría del ENOS).

Cuadro 1. Eventos extremos ocurridos en 1995, 1999, 2007, 2008, 2010, 2013 y 2020

Año	Fecha	Fenómeno	Municipios	Daños causados	Pérdidas (Millones de Pesos)	ENOS
1995	27 de septiembre al 2 de octubre 8 al 20 de octubre	Depresión Tropical Opal Huracán Roxanne	Centro	13 defunciones, 30 216 viviendas dañadas y perdida de 14 370 ha de pastizales. Afectaciones en el sistema eléctrico, de agua y caminos de acceso. Desbordes de ríos, arroyos y cuerpos lagunares.	$10	La Niña
1999	2 al 22 de septiembre 20 de septiembre al 1 de octubre 4 al 6 de octubre	Onda Tropical No.29, 30, 31 y 32 Frente frío No. 4 Depresión Tropical No. 11	Todos	161,521 afectados, daños en el sistema de agua, luz y caminos de acceso. Inundaciones en áreas urbanas y suburbanas y de uso agropecuario. (Desborde del Carrizal). Incremento en los niveles de los ríos y lagos.	$2,558	La Niña
2007	11 de octubre 22 al 24 octubre 2 al 3 de noviembre 28 de octubre al 7 de noviembre	Frente Frío No.2, 4 y 5 Ciclón Tropical Noel	Todos	Pérdidas en la infraestructura económica y social (500 mil afectados). Ecosistemas afectados por la disolución de contaminantes s y transportados por las corrientes de agua. Desbordamiento de los ríos Carrizal, La Sierra, Teapa, Samaria, Pichucalco, Viejo Mezcalapa y Grijalva.	$31,800	La Niña
2008	25 al 30 de septiembre 18 al 22 de octubre	Onda Tropical No.32, 33 y 34 Frente Frío No. 4 interactuó con los remanentes de la Depresión Tropical No.16	Centla, Comalcalco, Emiliano Zapata, Jalpa de Méndez, Paraíso, Balancán, Huimanguillo, Jonuta y Nacajuca	Desbordamiento del río Usumacinta. Las aguas de las marismas, lagunas y humedales, incluso en las zonas protegidas como los pantanos de Centla, sufren contaminación y degradación acumulativa.	$5,277	Neutro
2010	14 al 18 de septiembre. 23 al 28 de septiembre.	Tormenta Tropical Karl Depresión Tropical Mathew	Balancán, Centro, Centla, Cunduacán, Emiliano Zapata, Jalapa, Jonuta, Macuspana, Nacajuca, Tacotalpa, Teapa y Tenosique	Desbordamiento de los ríos Samaria, Carrizal, Grijalva, Usumacinta, de la Sierra, Pichucalco y San Pedro. 130,222 habitantes afectados.	$7,392	La Niña

Año	Fecha	Fenómeno	Municipios	Daños causados	Pérdidas (Millones de Pesos)	ENOS
2013	13 al 15 de noviembre	Frente Frío No. 12	Balancán, Cárdenas, Centla, Comalcalco, Emiliano Zapata, Jalapa, Jalpa de Méndez, Jonuta, Macuspana Nacajuca y Tenosique	113 mil damnificados y 114 escuelas afectadas.	$503	Neutro
	23 al 25 de diciembre	Frente Frío No. 20	Centla, Centro y Teapa	Desbordamiento de las zonas bajas de los ríos Tulijá, Usumacinta y Grijalva.		
2020	28 de septiembre al 2 de octubre 26 al 31 de octubre 1 al 5 de noviembre	Frente frío No. 4, 9 y 11.	Todos	800 mil personas afectadas, 200 mil 400 viviendas, 10 personas fallecidas, 511 escuelas dañadas, 2059 km de carretera estatal y municipal con daños.	$2,383	La Niña
	2 al 5 de octubre	Tormenta Tropical Gamma				
	4 al 10 de octubre	Ciclón Tropical Delta				
	24 al 29 de octubre	Ciclón Tropical Zeta				

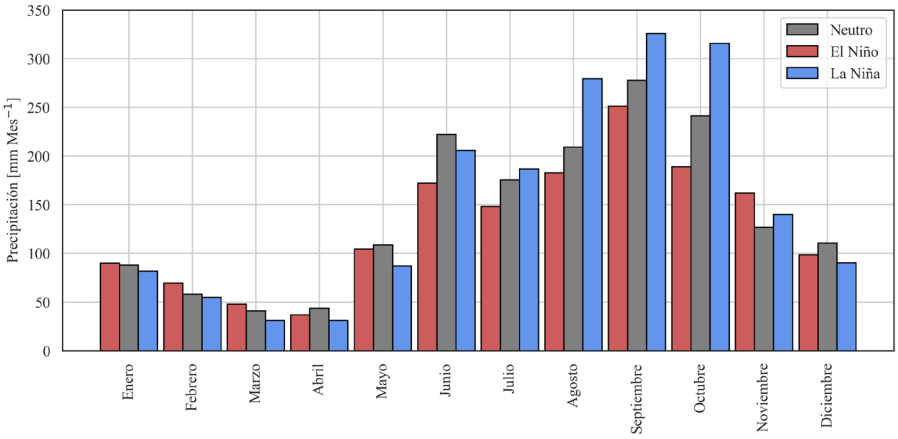
Fuente: elaboración propia.

2.1 ENOS y precipitación anual en Tabasco

Partiendo de las series diarias de precipitación CHIRPS, se calculan los acumulados mensuales, que se define como una sumatoria de la precipitación diaria para cada mes. Una vez acumulados, se calculan los promedios multianuales para cada mes, considerando las fases del ENOS. La figura 4 muestra el ciclo anual correspondiente a cada fase ENOS. Se puede observar que, en general, para el período principal de lluvias se esperan acumulados de precipitación mensuales mayores durante los años La Niña que durante los años Neutro y El Niño. Las mayores precipitaciones se observan en los meses de agosto, septiembre y octubre; en los cuales la actividad ciclónica tropical y las ondas de este pueden producir eventos extremos de precipitación en la región. La presencia de más eventos extremos de precipitación aumenta el promedio de los acumulados mensuales (en particular durante años La Niña). Durante los meses de diciembre a mayo, se observa que El Niño produce acumulados mensuales ligeramente mayores a La Niña. Esto se debe a que los frentes fríos son más activos que lo normal durante esta fase y producen una

mayor precipitación a lo normal. El Niño tiende a favorecer la entrada de frentes fríos hasta el sur de México desde diciembre hasta mayo.

Figura 4. Ciclo anual de la precipitación en Tabasco de acuerdo a la fase del ENOS.



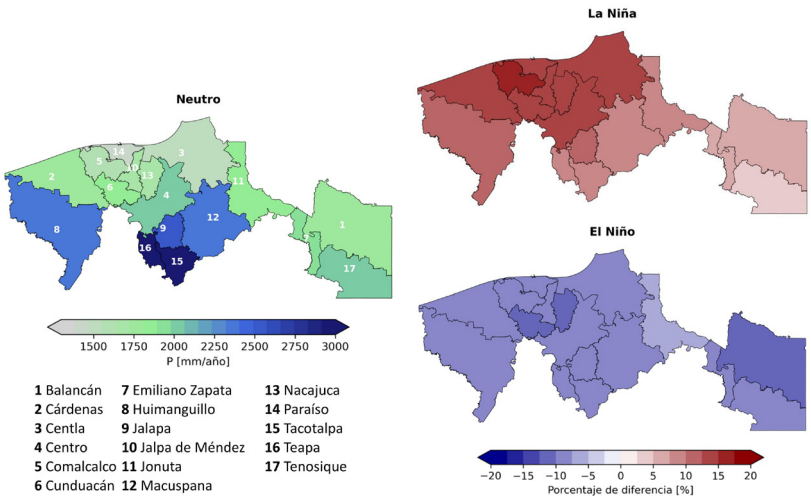
Fuente: elaboración propia.

Se puede realizar un análisis similar para los acumulados anuales. Debido a que existen diferencias regionales en el comportamiento de la amenaza; es importante analizar municipalmente cómo se comporta, para esto, se calculan los promedios de precipitación anual, usando los datos de CHIRPS de los 17 municipios que componen el estado. El panel izquierdo de la figura 5 muestra para cada municipio el promedio de la precipitación acumulada anual considerando únicamente los años Neutros. Esta precipitación anual consiste en la sumatoria diaria para promediar este valor, considerando únicamente los años neutros. Se puede observar el promedio de la precipitación acumulado, varía aproximadamente desde los 1,400 (Centla) mm/año hasta los 3,400 mm/año (Teapa).

Estas diferencias regionales se deben principalmente a las diferencias topográficas que existen en el estado. Las mayores precipitaciones acumuladas están asociadas a las sierras ubicadas en la frontera sur del estado. Las fases activas del ENOS tienen una importante influencia en la variabilidad climática de la precipitación anual. Los paneles de la derecha, Figura 5 se muestra el porcentaje de diferencia en la precipitación promedio anual para las fases La Niña y El Niño; en comparación con los valores de la fase Neutra. La Niña produce aumentos en la precipitación acumulada anual para todos los municipios que varían aproximadamente desde el 5% (Tenosique) hasta el 15 %

(Comalcalco). Sin embargo, de manera opuesta, El Niño produce reducciones en los acumulados anuales para todos los municipios que oscilan entre 7% y 11%.

Figura 5. Precipitación acumulada anual promedio multianual para años Neutros (panel izquierdo). Porcentaje de diferencias la precipitación acumulada anual promedio multianual para La Niña respecto a Neutro (panel superior derecho) y para El Niño respecto a Neutro (panel inferior derecho)



Fuente: elaboración propia.

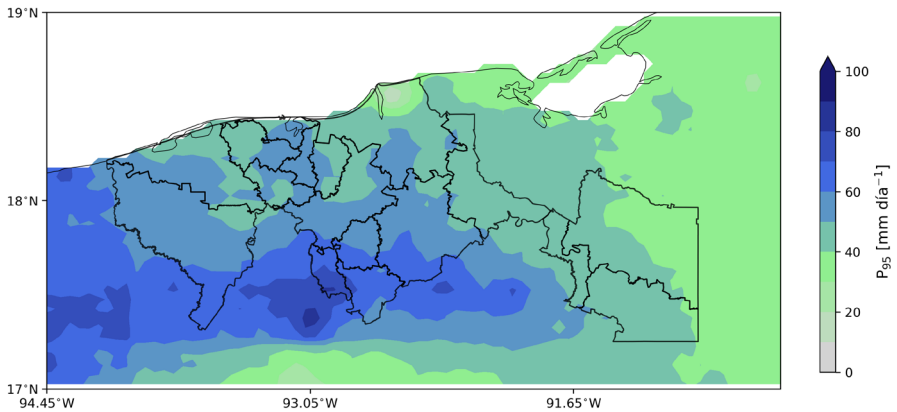
Estas diferencias en los acumulados anuales son muy importantes para la gestión del recurso hídrico en la región y, en particular, para definir reglas de operación de las presas y los ríos. De esta manera, el conocimiento previo de la fase del ENOS puede ser de gran utilidad en la toma de decisiones para la gestión regional del recurso hídrico.

2.2 ENOS y los eventos extremos en Tabasco

Los eventos extremos de precipitación se ven igualmente afectados por las fases del ENOS. Al cambiar los acumulados anuales, se espera también que la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos se vea afectada. Para estudiar su influencia sobre los eventos extremos, se estima la precipitación correspondiente al percentil 95 (P95) para cada uno de los píxeles de CHIRPS en la región. La figura 6 muestra la distribución espacial de este valor en la

región de estudio, según la base de datos CHIRPS. Es evidente que la topografía juega un rol esencial en el comportamiento espacial del P95, ya que los mayores valores de precipitación se encuentran ubicados en las sierras al sur del estado.

Figura 6. Percentil 95 (P95) para la precipitación acumulada diaria



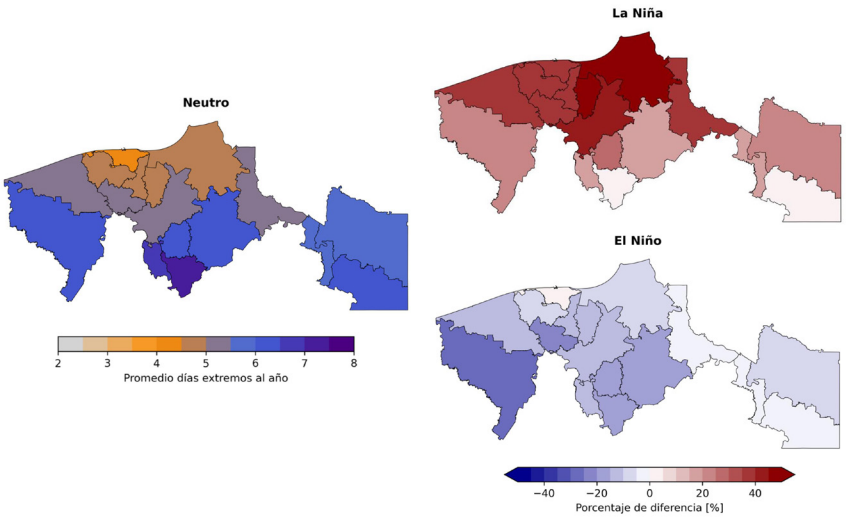
Fuente: elaboración propia.

Usando este P95, se calcula el número de días en los que se excede el valor para cada punto de la malla y se calcula el promedio anual de este valor; es decir, se obtiene un valor del número de días de eventos extremos de lluvia por año y después, se promedia. El número de días de eventos extremos en un indicador que permite estimar el nivel de amenaza, ya que un mayor número esperado de días de eventos extremos corresponde a una mayor exposición a la amenaza. Por lo tanto, este indicativo se asocia a una mayor probabilidad de ocurrencia de desastres asociados a fenómenos hidrometeorológicos.

Para estimar el nivel de amenaza a la que se encuentra expuesto cada municipio, se calculan los promedios del número esperado de días de eventos extremos por municipio. En el panel izquierdo de la figura 7, se puede observar el promedio anual de los días de eventos extremos esperados para los municipios de Tabasco bajo las condiciones Neutras. En general, los municipios de Tabasco tienen entre 5 y 7 días, de eventos extremos de precipitación cada año. Los paneles de la derecha muestran el porcentaje de diferencia del comportamiento de la amenaza (eventos extremos de precipitación) durante las fases La Niña y El Niño, en comparación con los valores de la fase Neutra. Durante La Niña se esperan en promedio 6 y 9 días con eventos extremos; es decir, los aumentos oscilan desde 4% (Tacotalpa) hasta 50% (Nacajuca). La Niña aumenta el promedio de días de eventos extremos al año en cada

municipio y, con ello, aumenta el nivel de amenaza. Los presentes resultados coinciden con la información histórica mostrada en el cuadro 1, donde los años La Niña resaltan por su costo económico.

Figura 7. Promedio multianual de días extremos para años Neutros (panel izquierdo). Porcentaje de diferencias del promedio multianual de días extremos para La Niña respecto a Neutro (panel superior derecho), y para El Niño respecto a Neutro (panel inferior derecho)



Fuente: elaboración propia.

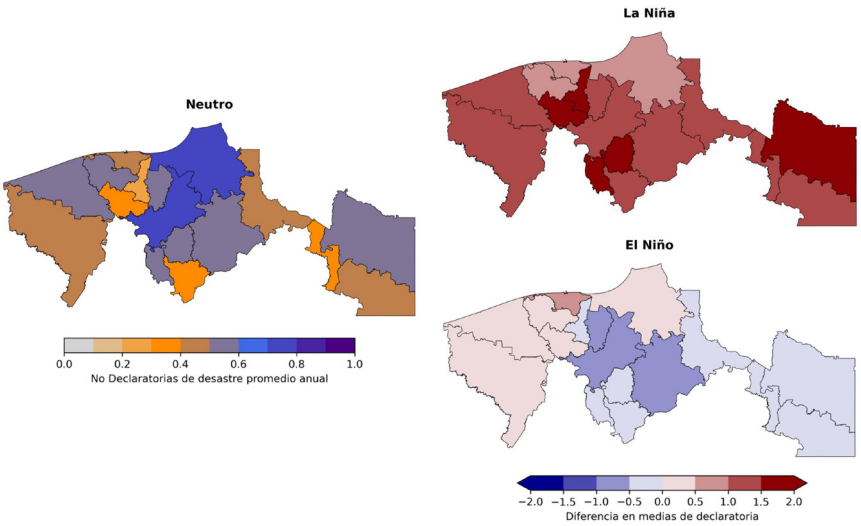
El Niño a presentado entre 4 y 6 días de eventos extremos de precipitación; es decir, induce una reducción en el número de días extremos para la mayoría de los municipios. Esta reducción varía entre 1% (Emiliano Zapata) y 25% (Huimanguillo). Sin embargo, el municipio de Paraíso muestra un pequeño incremento de 0.13% que posiblemente se asocia a los eventos extremos de precipitación causados por el paso de los frentes fríos en invierno. Estos cambios en el número esperado de días muestran que el ENOS tienen un efecto directo en el comportamiento regional de la amenaza, debido a que modula el comportamiento de los fenómenos hidrometeorológicos que afectan a Tabasco. Los cambios estacionales en la frecuencia de estos fenómenos hidrometeorológicos dependen del ENOS y, así, esta información climática puede servir como una herramienta para la toma de decisiones y la gestión integral de riesgo con mayor énfasis en la parte de la gestión prospectiva (LGPC, 2012).

Los resultados obtenidos se pueden comparar con las declaratorias de desastre ocurridas en el estado de Tabasco. De forma similar se realizó para la precipitación; construir mapas que muestren un promedio anual de las declaratorias de desastre a partir de una base de datos del Centro Nacional de Prevención de Deasastres (CENAPRED). Para construir estos mapas, se debe considerar únicamente la información correspondiente del estado de Tabasco y, seleccionar la información municipal que contiene los municipios afectados, los tipos de declaratoria (desastre) y eventos hidrometeorológicos asociados (lluvia, ciclón tropical e inundación). Usando esta información, se puede contar el número de declaratorias de desastre por municipio durante el período del 2000 - 2021. Es ideal que esta base tenga un período más prolongado de datos. Sin embargo, inicia en el 2000. Así que, considerando esta información por año, es posible calcular el promedio anual de estas declaratorias de acuerdo con la fase del ENOS.

En el panel izquierdo de la figura 8, se muestra el promedio de declaratorias de desastre para los años Neutros durante el período 2000-2021. En el panel derecho, se pueden observar la diferencia entre las declaratorias durante años La Niña y las declaratorias durante años El Niño, respecto a los años Neutros. Es importante mencionar que 6 años son La Niña y 4 años son El Niño durante este período debido a la corta disponibilidad de los datos.

La figura 8 muestra un claro patrón: existe un aumento del número de declaratorias durante años La Niña y una reducción de las declaratorias durante años El Niño, excepto en los municipios colindantes al Golfo de México, los cuales pueden ser afectados por eventos extremos de precipitación asociados a frentes fríos durante la época invernal. Esto sugiere que la presencia de los desastres está relacionada con las fases del ENOS en Tabasco. Sin embargo, es importante mencionar que las declaratorias de emergencia también pueden tener connotaciones políticas no relacionadas con el comportamiento de las amenazas.

Figura 8. Promedio multianual de declaratorias de desastre por municipio para años Neutros (panel izquierdo). Diferencia del promedio multianual de días extremos para La Niña respecto a Neutro (panel superior derecho), y para El Niño respecto a Neutro (panel inferior derecho)



Fuente: elaboración propia

Conclusiones

Las oscilaciones climáticas como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) inducen cambios en el clima, los cuales modulan el comportamiento de los fenómenos meteorológicos que afectan a México, incidiendo también en el comportamiento de los eventos extremos. Los eventos extremos de lluvia se pueden considerar como una amenaza hidrometeorológica, ya que son sucesos naturales que producen pérdidas en la infraestructura, la vida humana y el funcionamiento de la sociedad o comunidad.

Tabasco ha sido históricamente afectado por inundaciones prolongadas. Esto debido a que es la zona del país donde se registran las mayores precipitaciones pluviales. Además, carece de la infraestructura adecuada para drenar la alta escorrentía asociada a las grandes cantidades de precipitación de la región. En este capítulo, se exploró cómo la lluvia acumulada, los eventos extremos de lluvia definidos por el P95 y las declaratorias de emergencia que cambian durante cada fase del ENOS en sus 17 municipios.

Se usó el índice oceánico de El Niño (ONI) para realizar una clasificación de los años en función de la fase del ENOS, considerando la temporada de junio a noviembre de cada año. Esta época corresponde al período de lluvias

para Tabasco, cuando ocurre la mayor parte de los eventos hidrometeorológicos extremos en el estado. Usando series diarias de precipitación de CHIRPS, se calcula el promedio anual de la precipitación acumulada mensual para cada fase del ENOS. Las mayores precipitaciones se observan en los meses de agosto, septiembre y octubre, que son los meses con actividad ciclónica tropical y ondas del este, ya que producen fuertes eventos de precipitación en la región, aumentando así, el promedio de los acumulados mensuales. Este aumento es más evidente durante los años La Niña en comparación con la fase neutral y El Niño.

A nivel municipal, los promedios de la precipitación acumulada anual muestran que los valores son mayores durante los años La Niña para todos los municipios, registrando aumentos que varían entre el 5% y 15 %, respecto a las condiciones Neutras; por el contrario, El Niño produce condiciones opuestas: reducciones en los acumulados del orden de 7% hasta 11%. Esta clara modulación del ENSO en la precipitación acumulada puede ser de utilidad en la toma de decisiones para la gestión regional del recurso hídrico ya que grandes cantidades de precipitación pueden dañar las operaciones de las presas o en su caso, los ríos de rápida respuesta pueden causar inundaciones aun cuando haya dejado de llover durante años La Niña.

Los eventos extremos de precipitación se ven igualmente afectados por las fases del ENOS. Se encontró que, para condiciones Neutras, los municipios de Tabasco esperan en promedio 5-7 días con eventos extremos de precipitación al año. En general, La Niña aumenta el nivel de amenaza en la región, produciendo un incremento en los días de lluvia extrema. Estos varían entre 4% y 50%. Para El Niño, se observa que para la mayoría de los municipios tienen una reducción en el número de días extremos, que varía entre un 1% y 25%. Estos cambios en el número esperado de días extremos muestran la modulación del ENOS sobre la amenaza de estos fenómenos hidrometeorológicos e información climática como una herramienta en la toma de decisiones y la gestión integral del riesgo. Los tomadores locales de decisiones necesitan estar informados con meses de anticipación, de cómo podría variar la amenaza municipalmente y, con ello, emprender acciones locales para prevenir los riesgos; es decir, esta información es valiosa para la gestión prospectiva del riesgo y a su vez, funcionar para reducir el riesgo existente y preparar una respuesta (fase correctiva de la gestión integral del riesgo; LGPC (2012)). Finalmente, estos resultados muestran claramente los aumentos o las disminuciones en las declaratorias de desastre para cada municipio del estado. Las fases del ENOS modulan la cantidad de los eventos extremos de lluvia que se presentan en la región aunado a una alta vulnerabilidad social, la falta de infraestructura adecuada y la degradación ambiental que modulan la ocurrencia de los desastres.

Bibliografía

Abreu-Lastra, R., y Gutiérrez, C. I. (2009). Cuando el Río Suena: *Las inundaciones en Tabasco y las políticas públicas*. Fundación Kaliz, A. C.

Aguilar Palafox, L. P. (2019). *Reseñas de Tabasco*. Colección Literatura, Serie Ensayo—Enrique González Pedrero. Secretaría de Cultura.

Alcántara-Ayala, I. (2019). Desastres en México: Mapas y apuntes sobre una historia inconclusa. *Investigaciones Geográfica*s, 100. https://doi.org/10.14350/rig.60025

Dominguez, C., Jaramillo, A., y Cuéllar, P. (2021). Are the socioeconomic impacts associated with tropical cyclones in Mexico exacerbated by local vulnerability and ENSO conditions? *International Journal of Climatology, 41*(S1), E3307–E3324. https://doi.org/10.1002/joc.6927

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., y Michaelsen, J. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—A new environmental record for monitoring extremes. *Scientific Data, 2*(1), 150066. https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66

Galindo, A. A., Ruiz, A. S., Morales, H. A., Sánchez, L. L., Carrizales, E., y Villegas, P. C. (2015). *Atlas de Riesgos del Municipio de Centro, 2015. H. Ayuntamiento Constitucional de Centro, Tabasco*. Servicios Integrales de Ingeniería y Calidad S.A. de C.V. Impreso por Talleres Yax-ol, Tabasco, México.

Glantz, M. H., y Ramirez, I. J. (2020). Reviewing the Oceanic Niño Index (ONI) to Enhance Societal Readiness for El Niño's Impacts. I*nternational Journal of Disaster Risk Science, 11*(3), 394–403. https://doi.org/10.1007/s13753-020-00275-w

Gobierno de Tabasco. (s.f.). *Regiones de Tabasco*. Portal Tabasco. https://tabasco.gob.mx/regiones-de-tabasco

Huang, B., L'Heureux, M., Hu, Z.-Z., y Zhang, H.-M. (2016). Ranking the strongest ENSO events while incorporating SST uncertainty. *Geophysical Research Letters, 43*(17), 9165–9172. https://doi.org/10.1002/2016GL070888

INEGI. (s/f). *Número de habitantes*. Tabasco. https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/tab/poblacion/

INEGI. (2001). *Síntesis de Información geográfica del estado de Tabasco*. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/historicos/2104/702825223939/702825223939_6.pdf

H. Congreso de la Unión (2012). Ley general de Protección Civil (LGPC) https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgpc.htm

Magaña, V. O., Vázquez, J. L., Pérez, J. L., y Pérez, J. B. (2003). Impact of El Niño on precipitation in Mexico. *Geofísica Internacional*. https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=56842304

Oliver-Smith, A., Alcántara-Ayala, I., Burton, I., y Lavell, A. (2017). The social cons-

truction of disaster risk: Seeking root causes. *International Journal of Disaster Risk Reduction,* 22, 469–474. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.10.006

Palma-López, D. J., Cisneros, D., Moreno, C., y Rincón-Ramírez, J. (2007). S*uelos de Tabasco: Su uso y manejo sustentable*. Colegio de Postgraduados-ISPROTAB-FUPROTAB. Villahermosa, Tabasco, México, 195 p.

Perdigón-Morales, J., Romero-Centeno, R., Barrett, B. S., y Ordoñez, P. (2019). Intraseasonal Variability of Summer Precipitation in Mexico: MJO Influence on the Midsummer Drought. J*ournal of Climate, 32*(8), 2313–2327. https://doi.org/10.1175/JCLI-D-18-0425.1

Philander, S. G., y Rasmusson, E. M. (1985). The Southern Oscillation and El Niño. En *Advances in Geophysics* (Vol. 28, pp. 197–215). Elsevier. https://doi.org/10.1016/S0065-2687(08)60224-1

United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UNISDR). (2017). *Terminology on Disaster Risk Reduction*. Geneva, Switzerland. United Nations Office for Disaster Risk Reduction. https://www.undrr.org/terminology

van der Wiel, K., y Bintanja, R. (2021). Contribution of climatic changes in mean and variability to monthly temperature and precipitation extremes. Communications *Earth y Environment, 2*(1), 1. https://doi.org/10.1038/s43247-020-00077-4

Zapata-Martí, R., y Arróliga, N. M. G. (2008). *Evaluación socioeconómica coordinada por CEPAL y CENAPRED*. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/38314/1/INUNDACIONESENTABASCO_es.pdf

Capítulo 15. Regionalización y caracterización climática de la sequía: México

Guadalupe Yolanda Valenzuela Morales [1]
Ricardo Arévalo Mejía [2]
Carlos Roberto Fonseca Ortiz [3]
Marivel Hernández Téllez [4]

Introducción

La sequía es un fenómeno climático que debido a las consecuencias ambientales, sociales y económicas que ocasionan desastres de forma perjudicial para la población (Ortega Gaucin, 2013). Este fenómeno es llamado el "desastre progresivo" (Mishra y Singh, 2010), pues se presenta lentamente (Dai, 2011; Lobato-Sánchez, 2016) hasta durar meses o años y cubrir extensas áreas (Sheffield *et al.*, 2012). Es un evento sin un patrón definido y recurrente en las zonas climáticas del mundo (Castillo-Castillo *et al.*, 2018; Esparza, 2014; Florescano Mayet, 1980) con diferentes intensidades y extensión en función de los patrones de circulación atmosférica (Rodríguez, 2005). Aunque se presenta con mayor frecuencia e intensidad en las zonas áridas y semiáridas (Esparza, 2014); se produce a raíz de la disminución o ausencia de precipitaciones pluviales respecto al valor medio histórico (OMM, 2006; Zilbert y Downs, 2013).

1 Doctora en Ciencias del Agua. Facultad de Enfermería y Obstetricia, Universidad Autónoma del Estado de México.

2 Doctor en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

3 Doctor en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

4 Doctora en Ciencias. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

El monitoreo de la sequía se ha convertido en parte integral de la planeación, preparación y mitigación de dicho fenómeno; tanto a escala regional, nacional e incluso local (Lobato-Sánchez, 2016). La sequía afecta en diversas formas dependiendo de las características del lugar donde ocurra (Esparza, 2014; Florescano Mayet, 1980). De ahí la relevancia de identificar las características climáticas en las regiones con períodos secos. Existen varias investigaciones cuyo propósito es regionalizar dicho fenómeno.

Poquet *et al.* (2020) regionalizaron la sequía en la Península Ibérica a partir del Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) y del modelo digital de elevación. Taibi y Souag (2011) emplearon un Análisis de Componente Principal (ACP) y más la información el SPI de los períodos secos en Argelia, identificaron cinco regiones afectadas por diferentes grados de severidad de sequía. Estrada-Medina *et al.* (2016) regionalizaron y caracterizaron la sequía en la Península de Yucatán. Analizaron los datos del SPI calculados para 85 estaciones meteorológicas de la Península a partir de indicadores como grado de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación generando una vulnerabilidad en la región. Así también Serrano-Barios *et al.* (2016), realizaron un análisis para comprobar las diferencias espaciales en el comportamiento de las sequías dentro de la región Cuenca Pacífico Norte. Utilizaron el SPI, el Índice de Precipitación Evapotranspiración Estandarizada (SPEI, por sus siglas en inglés) aplicando un ACP y, encontrando una evolución en las sequías, presentando cierta variabilidad espacial en la región.

En esta investigación se realizó una regionalización de la sequía en México, a través de técnicas de análisis multivariado como el ACP y los Árboles de Regresión y Clasificación (CART) con el objetivo de identificar los municipios que han presentado las sequías de mayor intensidad conforme a sus características climáticas durante el período 2003-2020. Las variables consideradas para efecto de la regionalización fueron: i) grado de intensidad de la sequía del monitor de sequía de México (D0, D1, D2, D3 y D4) [20] y ii) 19 variables bioclimáticas (Cuervo-Robayo *et al.*, 2013).

1. Metodología

Se utilizó un enfoque multivariable para el procesamiento y análisis de datos. Dicho análisis se realizó mediante el *software Statistical Package for the Social Sciences SPSS V23*. La investigación se dividió en tres fases. La primera contabilizó el número de sequías presentadas en cada municipio de acuerdo con la escala de intensidades del Monitor de Sequía de México (SMN, 2020). Posteriormente, el número de sequías que ponderó el factor proveniente de una función exponencial con la finalidad de obtener una valoración numérica donde las sequías extremas (D3) y excepcionales (D4) impactan en mayor grado (Cuadro 1).

Cuadro 1 Ponderación de la sequía de acuerdo con la escala de intensidades

Escala de intensidad	Simbología	Factor
Anormalmente seco	D0	0
Sequía moderada	D1	0.125
Sequía severa	D2	0.25
Sequía extrema	D3	0.5
Sequía excepcional	D4	1.0

Fuente: elaboración propia.

La segunda fase utilizó 19 variables bioclimáticas (Cuadro 2), el tratamiento, manejo e interpretación territorial de dichas variables se realizó a través del paquete de Sistema de Información Geográfica *QGIS 3.12* (*Quantum GIS Development Team, 2016*). A partir del formato ráster con una resolución de 1 km^2 se extrajo la moda por municipio.

Cuadro 2 Variables bioclimáticas

	Variable		Variable
Bio 1.	Temperatura media anual	Bio 11.	Temperatura media del trimestre más frío
Bio 2.	Rango de temperaturas diurnas	Bio 12.	Precipitación anual
Bio 3.	Isotermalidad	Bio 13.	Precipitación del mes más lluvioso
Bio 4.	Estacionalidad en la temperatura	Bio 14.	Precipitación del mes más seco
Bio 5.	Temperatura máxima del mes más cálido	Bio 15.	Estacionalidad en la precipitación
Bio 6.	Temperatura mínima del mes más frío	Bio 16.	Precipitación del trimestre más lluvioso
Bio 7.	Rango anual de temperatura	Bio 17.	Precipitación del trimestre más seco
Bio 8.	Temperatura media del trimestre más lluvioso	Bio 18.	Precipitación del trimestre más cálido
Bio 9.	Temperatura media del trimestre más seco	Bio 19.	Precipitación del trimestre más frío
Bio 10.	Temperatura media del trimestre más cálido		

Fuente: elaboración propia.

En seguida, se realizó un análisis de correlación entre las variables bioclimáticas evaluando con la medida *Keiser-Meyer-Olkin* (KMO). Dicha medida se utilizó para valorar la idoneidad de la aplicación del ACP. El programa *SPSS* por defecto desarrolla el ACP bajo el criterio *Gutman-Kaiser*, es decir, selecciona los componentes principales con eigen valor igual o mayor a 1. Dichos componentes se utilizaron con el fin de reducir un conjunto de variables correlacionadas a la dimensión más simplificada (Morales, 2011). Finalmente, en la tercera fase se utilizó el algoritmo CART para agregar estadísticamente las variables bioclimáticas en función de la escala de intensidades de sequía presentadas por los municipios de México. De esta manera, el CART se ejecutó a partir de los valores propios de los componentes obtenidos en el ACP para cada municipio.

Nuevamente se empleó el CART por la gran variedad de ventajas que presenta en comparación con otros métodos de clasificación. El CART clasifica en función de una variable dependiente, no es necesario que se cumpla ningún tipo de distribución específica, no se ven influenciados por outliers; las variables independientes pueden ser tanto continuas como categóricas, entre otras (Taghi Sattari *et al.*, 2012). Asimismo, es importante señalar que el ACP no solo se utilizó para reducir la dimensionalidad, sino también para evitar el sobre ajuste que presentan los CART (Berlanga *et al.*, 2013).

2. Resultados y discusión

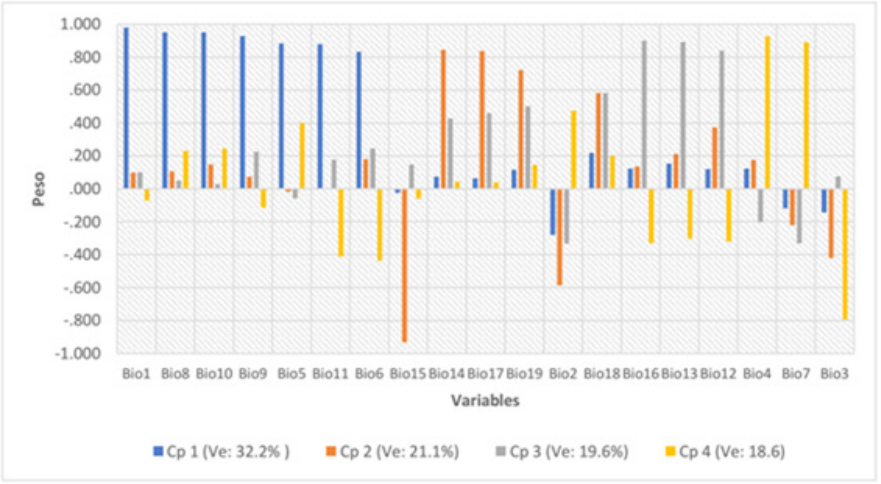
La evaluación de la matriz de correlación en las variables bioclimáticas con la prueba de *Keiser-Meyer-Olkin* (KMO) señala que ACP es idóneo. Se obtuvo un KMO=0.874. El estadístico KMO varía entre 0 y 1, de tal modo que el resultado es ≥0.75, la idoneidad de los datos se considera excelente, 0.75 ≥KMO ≥0.5 es aceptable y si KMO<0.5 es inaceptable (Hair *et al.*, 2000).

El ACP de las 19 variables bioclimáticas, resumió las variables en cuatro componentes principales (Cp) con una varianza explicada total de 91.7% (Fig. 1). El Cp 1 está integrado por la Bio 1, Bio 8, Bio 10, Bio 9, Bio 5, Bio 11 y Bio 6; relacionado positivamente con la mayoría de las variables bioclimáticas de temperatura. El Cp dos está conformado por las Bio 15, Bio 14, Bio 17, Bio 19, Bio 2 y Bio 18; se vincula negativamente con la Bio 15 y la Bio 2, con el resto de las bioclimáticas su relación es positiva. El Cp tres está conformado únicamente por la Bio 16, Bio 13 y Bio 12; presenta una asociación positiva con dichas variables. El Cp cuatro está constituido por la Bio 4, Bio 7 y Bio 3, relacionado negativamente con la Bio 3 y positivamente con Bio 4 y Bio 7.

El análisis de CART se efectúo con cuatro variables de entrada, es decir, los 4 Cp del grupo de variables bioclimáticas. De manera que el CART clasificó los municipios en función de la escala de intensidad en las sequías considerando las variables bioclimáticas. El resultado del CART indica que las variables independientes (Cp) influyeron en la clasificación Cp 4, Cp 1, Cp 3 y Cp

2 de manera jerárquica. El Cp 4 es importante para la formación de la región uno y dos. El Cp 4, Cp 1 y Cp 3 influyeron en la formación de la región tres y cuatro. El Cp 4, Cp 1 y Cp 2 participaron en la estructuración de la región cinco y seis (Figura 2). El árbol de regresión tuvo 6 nodos terminales que clasificaron a los municipios en seis regiones homogéneas (Cuadro 3).

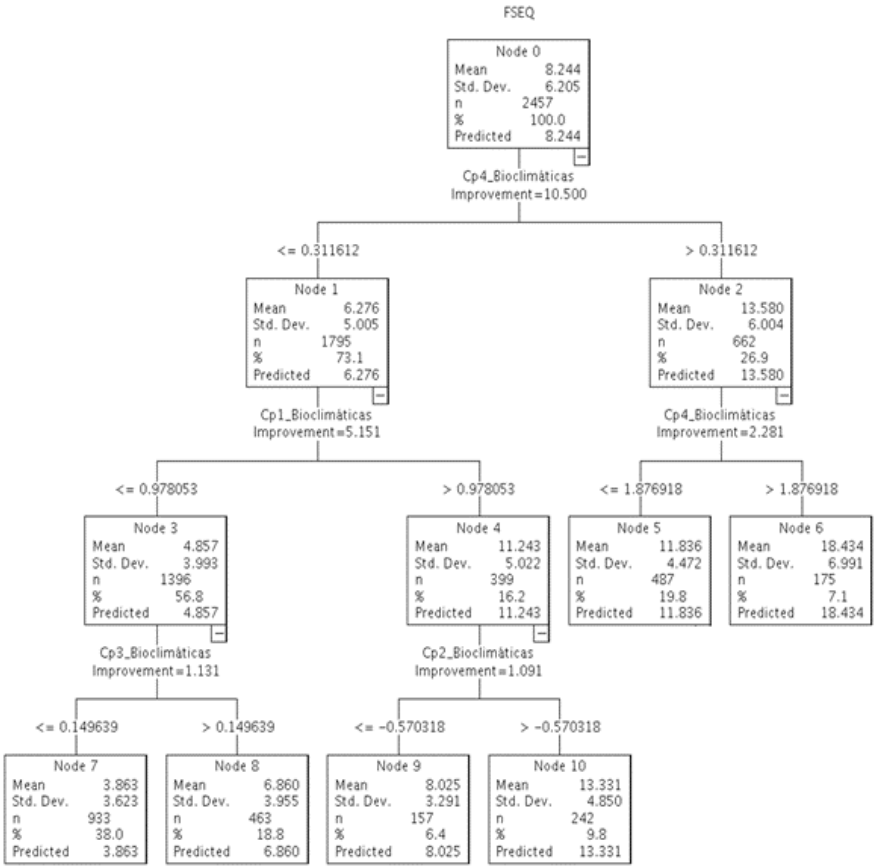
Figura 1. Pesos de los componentes principales de las variables climáticas. Ve: Varianza explicada del componente



Fuente: elaboración propia.

La distribución espacial del CART se aprecia en la Fig. 3. Descripción detallada de las regiones considerando las variables bioclimáticas más representativas ya que algunas presentan comportamientos similares.

Figura 2. Resultado del CART



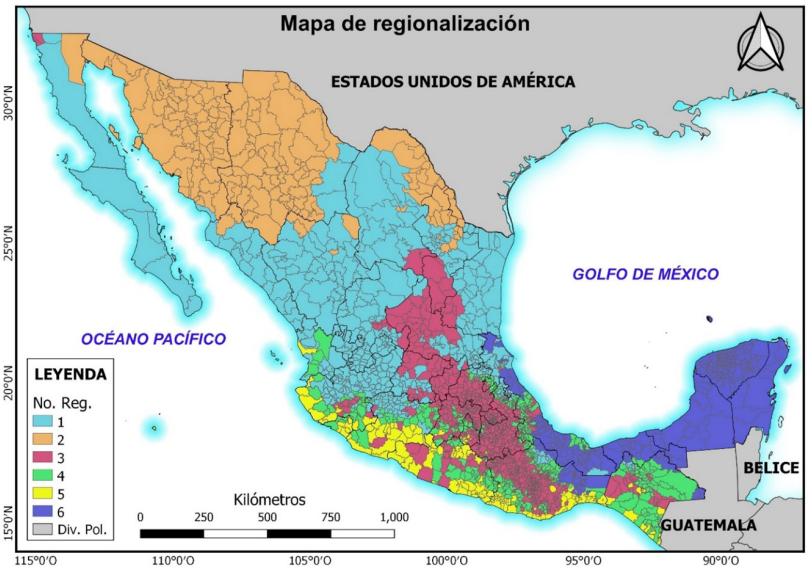
Fuente: elaboración propia.

Cuadro 3 Relación de nodos con regiones

Nodo	Región	No. de municipios
5	1	487
6	2	175
7	3	933
8	4	463
9	5	157
10	6	242

Fuente: elaboración propia.

Figura 3. Regionalización climática de las sequías



Fuente: elaboración propia.

Las regiones encontradas se caracterizan por:

- Región 1. La temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x}$ = 19.4; C.V. = 0.17). La precipitación oscila desde los 121.3 mm a los 3525 mm. Presenta valores del factor de severidad que se encuentran dentro del intervalo de 3 a 48 (Cuadro 4).
- Región 2. La temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x}$ = 17.97; C.V. = 0.20). La precipitación oscila desde los 42.8 mm a los 964.9 mm. Presenta valores del factor de severidad que se encuentran dentro del intervalo de 8 a 41 (Cuadro 5).
- Región 3. La temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x}$ = 16.94; C.V. = 0.20). La precipitación oscila desde los 233.6 mm a los 1477.8 mm. Presenta valores del factor de severidad que se encuentran dentro del intervalo de 0 a 52 (Cuadro 6).
- Región 4. La temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x}$ = 17.53; C.V. = 0.20). La precipitación oscila desde los 706.1 mm a los 4307.4 mm. Presenta valores

del factor de severidad que se encuentran dentro del intervalo de 0 a 26 (Cuadro 7).

- Región 5. La temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x}$ = 25.34; C.V. = 0.06). La precipitación oscila desde los 651.4 mm a los 2788.8 mm. Presenta valores del factor de severidad que se encuentran dentro del intervalo de 1 a 17 (Cuadro 8).
- Región 6. La temperatura media anual muestra poca variación con respecto al valor medio del grupo ($\bar{x}$ = 25.7; C.V. = 0.02). La precipitación oscila desde los 722.4 mm a los 2991.7 mm. Presenta valores del factor de severidad que se encuentran dentro del intervalo de 3 a 33 (Cuadro 9).

A partir de la caracterización de las regiones se encontró que en la región dos se hayan los municipios que han presentado las sequías de mayor intensidad. Lo anterior de acuerdo con la escala de intensidad del Monitor de Sequía de México. Seguida por la región uno y tres; donde la región menos afectada por este fenómeno es la cuatro, seguida de la cinco y la seis.

Los resultados obtenidos coinciden con los obtenidos por García Acosta (1993) quien realizó una regionalización histórica de las sequías y encontró que durante la época prehispánica hubo presencia de déficits pluviométricos en el sur de la república, aunque la mayor parte de ellos se presentaron en el norte y centro del país. De igual manera los estudios realizados con el Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED, 2017), identificaron que la región norte y centro del territorio mexicano son las más vulnerables ante la presencia de sequía. Existe un gran acervo de investigaciones sobre la sequía en México, sin embargo, muchos trabajos solo analizan cierta área de la república; debido a lo anterior no es factible hacer una comparación objetiva con los resultados obtenidos.

Conclusiones

El presente estudio muestra una regionalización que permitió identificar las diferencias y similitudes climáticas de los municipios de la república mexicana en función del factor de intensidad de las sequías; lo anterior da respuesta al objetivo planteado en el presente capítulo. Se encontró que las sequías se han presentado a lo largo y ancho de la República Mexicana durante el período de análisis. Sin embargo, las sequías con mayor grado de intensidad han ocurrido en la región centro y norte del país. Adicionalmente, la regionalización obtenida tiene un uso potencial al integrar variables bioclimáticas, porque permite identificar cuáles son los municipios más vulnerables ante la presencia de dicho fenómeno, así como sus características bioclimáticas.

México presenta una gran variabilidad climática, producto de factores tales como la precipitación y temperatura, regidas principalmente por la estacionalidad. Por lo tanto, un análisis de sequía considera esta variabilidad, debido a los efectos de un período seco en una región árida pues no son los mismos que una húmeda. De igual forma, los efectos de la sequía en dos regiones diferentes con características climáticas semejantes podrían ser divergentes. Se considera pertinente incluir variables sociales y económicas que permitan hacer una caracterización más integral de los períodos de sequía; permitiendo identificar las regiones más vulnerables social y económicamente.

Bibliografía

Berlanga, V., Rubio Hurtado, M. J., y Vilà Baños, R. (2013). Cómo aplicar árboles de decisión en SPSS. REIRE. *Revista d'Innovació i Recerca en Educació, 6*(1), 65-79.

Castillo-Castillo, M., Ibáñez-Castillo, L. A., Valdés, J. B., Arteaga-Ramírez, R., y Vázquez-Peña, M. A. (2018). Pronóstico de sequías meteorológicas con filtro de Kalman discreto en la cuenca del río Fuerte, México. *Agrociencia, 52*(7), 911–932.

CENAPRED. (2017). *Impacto socioeconómico de los desastres de 2000-2015*. https://datos.gob.mx/busca/dataset/impacto-socioeconomico-de-desastres-de-2000-a-2015

Cuervo-Robayo, A. P., Téllez-Valdés, O., Gómez-Albores, M. A., Venegas-Barrera, C. S., Manjarrez, J., y Martínez-Meyer, E. (2013). An update of high-resolution monthly climate surfaces for Mexico. *International Journal of Climatology, 34*, 2427–2437.

Dai, A. (2011). Drought under global warming: A review. Wiley Interdisciplinary Reviews: *Climate Change, 2*(1), 45–65.

Esparza, M. (2014). La sequía y la escasez de agua en México: Situación actual y perspectivas futuras. *Secuencia*, 89, 193–219.

Estrada-Medina, H., Cobos-Gasca, V., Acosta-Rodríguez, J. L., Peña Fierro, S., Castilla-Martínez, M., Castillo-Carrillo, C., Franco-Brito, S., López-Castillo, D., López-Díaz, M., y Luna-Flores, W. (2016). La sequía de la península de Yucatán. *Tecnología y ciencias del agua, 7*(5), 151–165.

Florescano Mayet, E. (1980). *Las sequías en México: Historia, características y efectos*.

García-Acosta, V. (1993). Las sequías históricas de México: Desastres y sociedad. *Revista semestral de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, 1*(1), 5–185.

Hair, J., Anderson, R., Tatham, R., y Black, W. (2000). *Análisis multivariante*. Prentice Hall.

Lobato-Sánchez, R. (2016). El monitor de la sequía en México. *Tecnología y ciencias del agua, 7*(5), 197–211.

Mishra, A. K., y Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of hydrology,* 391(1–2), 202–216.

Morales, V. P. (2011). *El análisis factorial en la construcción e interpretación de tests, escalas y cuestionarios*.

OMM. (2006). *Vigilancia y alerta temprana de la sequía: Conceptos, progresos y desafías fututors*. Organización Meteorológica Mundial. http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO_drought_monitoring_early_warning_es_2006.pdf

Ortega Gaucin, D. (2013). *Sequía: Causas y efectos de un fenómeno global*.

Poquet, D., Belda, F., y García-Haro, F. J. (2020). Regionalización de la sequía en la Península Ibérica desde 1950 hasta 2007 a partir del SPI y una modelización digital terreno. *Acta de las Jornadas Científicas de la Asociación Meteorológica Española*, 30, 5.

Rodríguez, J. Á. (2005). Regionalización y caracterización de sequías en Europa. *Ingeniería Civil*, 131, 43.

Serrano-Barios, L., Vicente-Serrano, S. M., Flores-Magdaleno, H., Tijerina-Chávez, L., y Vázquez-Soto, D. (2016). Variabilidad espacio-temporal de las sequías en la cuenca del pacífico norte de México (1961-2010). *Cuadernos de Investigación Geográfica, 42*(1), 185–204.

Sheffield, J., Wood, E. F., y Roderick, M. L. (2012). Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491(7424), 435–438.

*Monitor de sequía de México (*SMN) (2020). *Monitor de sequía de México*. Comisión Nacional del Aguas. Gobierno de México.

Taghi Sattari, M., Anli, A., Apaydin, H., y Kodal, S. (2012). Decision trees to determine the possible drought periods in Ankara. *Atmósfera, 25*(1), 65–83.

Taibi, S., y Souag, D. (2011). *Regionalization of drought in Northern Algeria using a standardized precipitation index (1936-2010)*. 169–182.

Zilbert, L., y Downs, M. (2013). *Recomendaciones técnicas para la elaboración de mapas de amenazas por sequía meteorológica*.

Anexos

Cuadro 4. Resumen de estadísticas para la Región 1

Variable	Unidades	Min	Q_1	$\bar{x}$	Q_3	Max	σ	C. V.
F_SEV	-	3.00	9.00	11.84	14.00	48.00	4.47	0.38
Bio 1	° C	9.58	16.96	19.46	22.39	26.53	3.44	0.18
Bio 2	° C	8.97	13.26	15.01	16.91	18.95	2.37	0.16
Bio 3	-	37.12	54.97	59.88	64.87	70.21	6.32	0.11
Bio 4	-	150.59	247.78	321.76	368.15	610.57	98.36	0.31
Bio 5	° C	21.83	29.96	31.94	34.03	40.14	2.76	0.09
Bio 6	° C	-5.22	3.42	6.67	10.14	17.75	4.16	0.62
Bio 7	° C	16.29	23.14	25.01	27.16	33.34	3.16	0.13
Bio 8	° C	7.41	19.20	22.05	25.34	30.79	3.86	0.18
Bio 9	° C	9.03	15.88	18.32	20.19	26.46	3.51	0.19
Bio 10	° C	13.19	20.00	22.87	26.34	30.66	3.84	0.17
Bio 11	° C	4.59	12.75	15.25	17.39	25.30	3.45	0.23
Bio 12	mm	121.38	535.08	879.45	1018.34	3525.00	571.09	0.65
Bio 13	mm	24.56	136.51	205.17	257.77	555.59	106.66	0.52
Bio 14	mm	0.00	2.50	12.41	16.07	119.87	17.93	1.45
Bio 15	-	44.25	75.69	96.15	115.82	143.83	22.46	0.23
Bio 16	mm	61.41	295.45	508.18	628.66	1560.23	286.17	0.56
Bio 17	mm	0.59	15.85	46.44	58.15	438.69	58.16	1.25
Bio 18	mm	5.79	124.35	226.69	284.24	784.51	155.49	0.69
Bio 19	mm	0.67	31.68	66.12	67.45	729.00	80.83	1.22

Fuente: elaboración propia.

Donde: F_SEV – Factor de severidad de sequía; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; $\bar{x}$ - media de los datos; σ- desviación estándar y C. V. – coeficiente de variación.

Cuadro 5. Resumen de estadísticas para la Región 2

Variable	Unidades	Min	Q_1	$\bar{x}$	Q_3	Max	σ	C. V.
F_SEV	-	8.00	13.00	18.43	22.00	41.00	6.99	0.38
Bio 1	° C	9.69	15.36	17.97	21.16	24.12	3.71	0.21
Bio 2	° C	12.77	16.44	17.11	18.26	21.63	1.74	0.10
Bio 3	-	40.50	48.20	51.74	54.81	66.13	4.71	0.09
Bio 4	-	306.17	534.18	577.11	633.54	759.99	80.48	0.14
Bio 5	° C	24.86	32.95	35.03	37.60	41.96	3.51	0.10
Bio 6	° C	-5.41	-1.16	1.78	5.04	8.79	3.62	2.04
Bio 7	° C	28.27	31.33	32.77	34.07	37.10	1.89	0.06
Bio 8	° C	13.37	20.81	23.76	26.65	31.56	4.25	0.18
Bio 9	° C	8.84	13.07	16.16	19.30	26.46	3.95	0.24
Bio 10	° C	14.22	21.71	24.62	28.24	31.32	4.20	0.17
Bio 11	° C	3.57	8.11	10.61	13.20	17.26	3.39	0.32
Bio 12	mm	42.87	343.27	456.65	531.64	964.90	156.32	0.34
Bio 13	mm	8.67	84.85	118.94	142.85	290.46	50.67	0.43
Bio 14	mm	0.03	2.72	6.14	7.44	21.46	5.59	0.91
Bio 15	-	39.33	78.84	93.55	110.12	122.63	21.93	0.23
Bio 16	mm	18.64	189.66	280.12	339.28	757.92	120.47	0.43
Bio 17	mm	0.95	14.23	26.05	33.72	68.64	16.97	0.65
Bio 18	mm	7.00	135.75	194.73	251.59	585.03	82.81	0.43
Bio 19	mm	19.08	41.17	64.62	88.28	137.87	30.48	0.47

Fuente: elaboración propia.

Donde: F_SEV – Factor de severidad de sequía; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; $\bar{x}$ - media de los datos; σ- desviación estándar y C. V. – coeficiente de variación.

Cuadro 6. Resumen de estadísticas para la Región 3

Variable	Unidades	Min	Q_1	$\bar{x}$	Q_3	Max	σ	C. V.
F_SEV	-	0.00	2.00	3.86	5.00	52.00	3.62	0.94
Bio 1	° C	5.58	14.82	16.95	19.48	23.52	2.99	0.18
Bio 2	° C	8.56	14.39	15.12	16.16	18.23	1.59	0.11
Bio 3	-	51.88	67.90	69.34	71.23	79.91	3.32	0.05
Bio 4	-	48.20	146.74	169.02	186.56	332.79	40.76	0.24
Bio 5	° C	14.41	25.52	27.65	30.12	36.09	3.21	0.12
Bio 6	° C	-1.55	2.95	5.91	8.27	16.94	3.33	0.56
Bio 7	° C	13.30	20.52	21.67	23.33	26.18	2.29	0.11
Bio 8	° C	5.21	15.74	17.85	20.25	25.31	3.02	0.17
Bio 9	° C	5.04	12.65	15.15	17.69	24.43	3.23	0.21
Bio 10	° C	6.88	16.46	18.58	21.08	25.85	3.06	0.16
Bio 11	° C	5.04	12.43	14.75	17.47	22.02	3.04	0.21
Bio 12	mm	233.69	653.31	750.82	861.85	1477.85	192.72	0.26
Bio 13	mm	48.74	140.36	163.73	189.95	310.18	44.97	0.27
Bio 14	mm	0.00	1.69	3.90	4.44	45.38	4.45	1.14
Bio 15	-	48.32	92.17	97.60	104.50	121.28	11.44	0.12
Bio 16	mm	113.85	362.46	428.15	505.41	793.92	120.53	0.28
Bio 17	mm	3.21	11.46	19.45	22.36	243.23	15.24	0.78
Bio 18	mm	7.00	79.59	102.53	112.36	451.74	45.50	0.44
Bio 19	mm	3.44	11.67	20.78	24.49	211.49	16.61	0.80

Fuente: elaboración propia.

Donde: F_SEV – Factor de severidad de sequía; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; $\bar{x}$ - media de los datos; σ- desviación estándar y C. V. – coeficiente de variación.

Cuadro 7. Resumen de estadísticas para la Región 4

Variable	Unidades	Min	Q_1	$\bar{x}$	Q_3	Max	σ	C. V.
F_SEV	-	0.00	4.00	6.86	9.00	26.00	3.96	0.58
Bio 1	° C	8.03	14.87	17.53	20.09	26.28	3.55	0.20
Bio 2	° C	8.40	11.81	12.82	13.86	17.11	1.65	0.13
Bio 3	-	52.25	64.31	67.77	71.12	85.49	5.44	0.08
Bio 4	-	27.66	121.70	157.76	192.31	335.95	55.38	0.35
Bio 5	° C	15.59	24.03	27.10	29.82	35.82	4.02	0.15
Bio 6	° C	-0.49	5.51	8.30	10.81	20.19	3.92	0.47
Bio 7	° C	10.64	17.31	18.72	19.85	25.76	2.31	0.12
Bio 8	° C	7.75	15.65	18.35	21.03	27.96	3.77	0.21
Bio 9	° C	7.11	14.54	17.14	20.04	26.06	3.90	0.23
Bio 10	° C	9.09	16.21	19.11	21.83	27.55	3.78	0.20
Bio 11	° C	6.80	13.00	15.47	17.95	23.56	3.33	0.22
Bio 12	mm	706.18	1143.51	1514.63	1785.95	4307.44	475.00	0.31
Bio 13	mm	171.21	263.77	317.34	357.58	728.85	77.47	0.24
Bio 14	mm	0.03	3.16	18.61	30.26	113.64	20.03	1.08
Bio 15	-	43.93	80.60	92.76	108.37	127.64	18.33	0.20
Bio 16	mm	465.21	683.75	845.72	965.96	1941.49	218.75	0.26
Bio 17	mm	4.23	17.20	68.60	104.28	389.26	67.06	0.98
Bio 18	mm	17.44	111.64	234.53	373.90	622.38	154.05	0.66
Bio 19	mm	5.13	21.36	86.26	119.07	651.31	97.12	1.13

Fuente: elaboración propia.

Donde: F_SEV – Factor de severidad de sequía; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; $\bar{x}$ - media de los datos; σ- desviación estándar y C. V. – coeficiente de variación.

Cuadro 8. Resumen de estadísticas para la Región 5

Variable	Unidades	Min	Q_1	$\bar{x}$	Q_3	Max	σ	C. V.
F_SEV	-	1.00	6.00	8.03	10.00	17.00	3.29	0.41
Bio 1	° C	21.31	24.06	25.35	26.75	27.96	1.62	0.06
Bio 2	° C	9.90	12.50	13.68	14.65	17.17	1.52	0.11
Bio 3	-	64.41	69.50	73.70	77.78	84.37	4.77	0.06
Bio 4	-	44.75	77.44	120.32	160.00	267.36	49.54	0.41
Bio 5	° C	31.31	33.89	34.83	35.66	38.90	1.41	0.04
Bio 6	° C	10.45	14.20	16.05	18.45	20.44	2.65	0.17
Bio 7	° C	12.31	16.34	18.48	20.67	25.18	3.06	0.17
Bio 8	° C	21.74	24.87	26.00	27.31	28.64	1.53	0.06
Bio 9	° C	20.59	23.86	25.09	26.73	28.69	1.95	0.08
Bio 10	° C	22.92	25.37	26.56	28.01	29.24	1.48	0.06
Bio 11	° C	19.41	22.50	23.93	25.43	27.34	1.95	0.08
Bio 12	mm	651.49	873.49	1086.66	1234.03	2788.82	322.82	0.30
Bio 13	mm	134.08	209.03	260.22	306.36	536.21	72.44	0.28
Bio 14	mm	0.00	0.28	0.96	1.38	4.69	0.92	0.95
Bio 15	-	83.18	111.91	113.94	117.75	128.78	6.48	0.06
Bio 16	mm	395.15	553.85	685.31	780.79	1497.59	194.11	0.28
Bio 17	mm	2.33	5.41	8.57	11.08	17.97	3.47	0.40
Bio 18	mm	12.10	46.72	101.70	126.44	558.44	88.05	0.87
Bio 19	mm	3.59	6.85	12.59	15.82	48.33	7.84	0.62

Fuente: elaboración propia.

Donde: F_SEV – Factor de severidad de sequía; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; $\bar{x}$ - media de los datos; σ- desviación estándar y C. V. – coeficiente de variación.

Cuadro 9. Resumen de estadísticas para la Región 6

Variable	Unidades	Min	Q_1	$\bar{x}$	Q_3	Max	σ	C. V.
F_SEV	-	3.00	11.00	13.33	14.75	33.00	4.85	0.36
Bio 1	° C	23.15	25.52	25.77	26.17	27.10	0.67	0.03
Bio 2	° C	8.08	10.65	11.83	13.19	14.95	1.39	0.12
Bio 3	-	45.73	60.19	64.39	67.96	72.15	4.69	0.07
Bio 4	-	131.56	190.77	208.91	226.30	367.30	37.26	0.18
Bio 5	° C	32.00	34.39	34.94	35.60	36.42	0.93	0.03
Bio 6	° C	13.13	15.87	16.46	17.12	19.51	1.13	0.07
Bio 7	° C	14.08	17.37	18.36	19.40	21.16	1.33	0.07
Bio 8	° C	24.26	26.85	27.12	27.60	28.12	0.65	0.02
Bio 9	° C	21.14	25.02	25.28	25.63	27.73	0.95	0.04
Bio 10	° C	24.50	27.66	27.81	28.10	29.10	0.58	0.02
Bio 11	° C	19.19	22.57	22.83	23.42	24.80	1.01	0.04
Bio 12	mm	722.41	955.27	1294.22	1621.36	2991.79	448.22	0.35
Bio 13	mm	120.36	186.85	262.75	332.16	656.67	95.65	0.36
Bio 14	mm	0.56	14.52	18.80	21.61	56.72	8.28	0.44
Bio 15	-	50.46	72.36	78.52	83.55	116.52	11.86	0.15
Bio 16	mm	318.97	464.92	673.32	887.66	1456.82	265.42	0.39
Bio 17	mm	3.92	55.75	70.86	80.95	210.97	31.22	0.44
Bio 18	mm	66.82	241.09	297.80	336.01	660.28	84.25	0.28
Bio 19	mm	4.74	74.83	114.92	128.53	477.77	77.79	0.68

Fuente: elaboración propia.

Donde: F_SEV – Factor de severidad de sequía; Q_1 – percentil 25 de los datos; Q_3 – percentil 75 de los datos; $\bar{x}$ - media de los datos; σ- desviación estándar y C. V. – coeficiente de variación.

Capítulo 16. Influencia del cambio del uso de suelo sobre la dinámica de la precipitación. Caso de estudio: Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma, México

Ana Gabriela Godinez Tovar [1]
Marlen Lopez Gutierrez [2]
Rocio Becerril Piña [3]
Carlos Alberto Mastachi Loza [4]

Introducción

El impacto del desarrollo humano sobre el medio ambiente y los recursos naturales es negativo debido al crecimiento de las ciudades ya que no posee un ordenamiento urbano sostenible y tampoco posee un análisis de los efectos climáticos, así como las posibles consecuencias de las actividades humanas (Villarreal y Candanedo, 2020). La expansión de las manchas urbanas absorbe comunidades, cuerpos de agua, cubiertas vegetales, zonas agrícolas y demás, con el paso del tiempo, llega a abarcar varios municipios circundantes (Méndez-Lemus, 2015).

La cobertura del suelo interviene en el intercambio de masa y energía entre la superficie y la atmosfera (Li *et al*., 2018). Por lo tanto, los componentes

1 Maestra en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

2 Maestra en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

3 Doctora en Ingeniería. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

4 Doctor en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México.

biofísicos a nivel local como el relieve, la vegetación y el clima, están fuertemente relacionados con el uso de suelo. La meteorología local e incluso la regional, podrían verse afectadas si las características del uso de suelo se ven modificadas a gran escala, lo que pudiera generar posteriormente inundaciones, sequías, disminución de los cuerpos de agua, afectar la calidad del aire, entre otras consecuencias (Zavaleta-Palacios *et al*., 2020). Por ello es importante el estudio del uso de suelo en series cronológicas que asistan a la planeación territorial y la gestión de los recursos naturales (Banchero *et al.*, 2020).

Como es sabido, el aumento de la población ha cambiado drásticamente el medio ambiente, por lo cual, el aumento en las áreas urbanas ha generado una pérdida en áreas de uso agrícola (Acheampong *et al*., 2018); además de coberturas propias del medio ambiente. De esta manera, es importante el análisis de cambio de uso de suelo para una mayor comprensión en la interacción del hombre con su medio ambiente.

El análisis de uso de suelo y su cobertura proporciona información de un manejo integral, es decir, describe en qué se ocupa principalmente la superficie territorial del medio ambiente. Además brinda pautas a la formulación de políticas con fines comerciales y administrativos, generando interacciones geográficas, medio ambientales y socioeconómicas (Rwanga y Ndambuki, 2017). Ahora bien, al cambiar el uso de suelo y las coberturas vegetales, principalmente por el hombre, se generan impactos negativos tanto en la biodiversidad como en los ecosistemas, alterando el clima regional y local (Sahagún-Sánchez y Reyes-Hernández, 2018).

Actualmente, el uso de la teledetección como herramienta para la clasificación del uso de suelo es más frecuente ya que facilita la evaluación de la distribución de uso de suelo y actualiza los cambios en las características geoespaciales. En contra parte, la precisión y calidad de la información generada depende del proceso de validación de datos que resulta lo más cercano a la realidad (Rwanga y Ndambuki, 2017).

Gracias a esta compilación de datos desde hace ya varias décadas es posible analizar información sobre el uso de suelo y el clima. Por lo tanto, es pfactible estudiar por medio de programas los componentes del clima y el tipo de uso de suelo a través del análisis de estos datos. A partir de este razonamiento es viable determinar la posible influencia del cambio del uso de suelo sobre la frecuencia e intensidad de la precipitación. Para ello, se analiza el impacto del cambio de uso de suelo en el CACARL (Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma) sobre el comportamiento de la precipitación a partir de la integración de bases de datos satelitales y la aplicación de métodos de análisis de series de tiempo.

1. Materiales y Métodos

1.1 Área de estudio

El Curso Alto de la Cuenca Alta del Río Lerma (CACARL) se encuentra en el centro de la República Mexicana, en el Estado de México comprende una extensión aproximada de 2,162 Km^2. Abarca alrededor de 22 municipios que a su vez se encuentran dentro del Valle de Toluca con una elevación promedio de 2,570 msnm en la vertiente norte de la Sierra Nahuatlaca-Matlazinca, así como la vertiente nororiental del Xinantecátl, hasta llegar aproximadamente a 9 Km aguas abajo de la presa José Antonio Alzate (Danilo y Díaz, 2000). Este valle comprende la Zona Metropolitana del Valle de Toluca (ZMVT), que abarca 16 de los 22 municipios del CACARL (Figura 1).

Figura 1. Ubicación del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con CONAGUA (2015) la precipitación media anual del Valle de Toluca está entre 800 y 1,000 mm, mientras que las laderas del Nevado de Toluca presentan precipitaciones mayores a 1,200 y 1,400 mm. La temporada de lluvias abarca de mayo a octubre, siendo la más intensa en los meses de junio a septiembre, con valores cercanos de 140 mm mensuales. En tanto que, la temporada de estiaje comprende los meses de entre noviembre y abril.

La configuración socioespacial se ha visto influenciada por las acciones del Estado Mexicano. Históricamente se identifican tres etapas: 1) Estado be-

nefactor (1910-1980): se excluyó buena parte de la población rural y priorizó a la urbana, lo que provocó una creciente migración del campo a la ciudad, 2) Estado neoliberal (1980-2000): se caracteriza por impulsar el mercado, privatizar el patrimonio público y reducir el papel del gobierno en el desarrollo nacional; esto generó, 3) Crisis del Estado (2000-2012): acciones fragmentadas y descoordinadas de los actores metropolitanos (Flores y Cenecorta, 2015).

La ciudad de Toluca surgió como un asentamiento fundamentalmente agrícola que, en las últimas décadas, ha migrado hacia un modelo metropolitano. Con una urbanización aproximadamente en 1979 a 1993 se identificó como zona metropolitana basada en la industria, diversificación de servicios y generación de empleos. En términos urbanísticos, su crecimiento ha caracterizado cuatro procesos: 1) la ocupación urbana a lo largo de vialidades e infraestructuras importantes, 2) el crecimiento de los asentamientos humanos en las cabeceras municipales, 3) la construcción de conjuntos urbanos de vivienda y asentamientos irregulares y 4) la construcción hormiga de edificaciones e instalaciones en torno de la zona metropolitana (Venancio, 2016).

1.2 Datos

En este estudio se utilizaron 20 años de datos correspondientes al 2000 hasta 2019, tomados de la base de datos de Daymet, la cual proporciona estimaciones cuadráticas, continuas y a largo plazo de variables meteorológicas y climatológicas diarias; usando interpolación y extrapolación de observaciones terrestres mediante técnicas de modelado estadístico. Las variables meteorológicas incluyen temperatura máxima, precipitación, radiación de onda corta, equivalente en nieve; datos que se producen en una cuadricula de 1 kilómetro por 1 kilómetro sobre América del Norte continental y Hawái desde 1980, en Puerto Rico desde 1950 hasta el final del año calendario completo más reciente (Thornton *et al.*, 2016). Se tomaron los datos diarios de precipitación, caracterizando dos componentes: lluvia total mensual y número de días con lluvia (LLTOT y NDLL respectivamente).

Además, se utilizaron las capas de información del uso de suelo y vegetación, obtenidas del portal de CONABIO que a su vez fueron elaboradas por INEGI. Usando los datos de dos de las seis series: la Serie II (1993) que se obtuvo a partir de imágenes satelitales de LANDSAT TM del año 1993, los cuales fueron validados con datos de campo y la Serie VI (2014) que se obtuvieron a partir de la interpretación de la información de los conjuntos de datos vectoriales en las imágenes LANDSAT TM8 del año 2014; estos datos fueron verificados con trabajo de campo (Geografía (INEGI), s.f.). Este conjunto de datos vectoriales se encuentra en una escala 1:250,000, la cual abarca todo el país y muestra la distribución de uso de suelo agrícola, vegetación natural e inducida, al igual que el uso pecuario y forestal, entre otros (Geografía (INEGI), s. f.).

1.3 Método

Se analizó la precipitación para obtener la Lluvia Total Acumulada (LLTOT) y Número de Días con Lluvia (NDLL). La LLTOT se calculó sumando la precipitación diaria correspondientes a cada mes desde enero de 2000 hasta diciembre de 2019 (Ecuación 1), respetando el número de días correspondientes a cada mes.

$$LLTOT_i = \sum_{j=1}^{n} LL_j \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde:
$LLTOT_i$ = Lluvia total acumulada del mes *i*
LL_j = Lámina de lluvia del día *j* en milímetros
n = número total de días del mes *i*
El NDLL se calculó a partir de la suma de días con precipitación mayor a cero (Ecuación 2), correspondientes a cada mes, para ello se realizó una reclasificación para obtener el conteo de días con lluvia Ecuación 3.

$$DLL_j = \begin{cases} 0 & \forall\ LL_j = 0 \\ 1 & \forall\ LL_j > 0 \end{cases} \qquad \text{Ecuación 2}$$

$$NDLL_i = \sum_{n=j}^{n} DLL_j \qquad \text{Ecuación 3}$$

$NDLL_i$ = Número de días con lluvia
DLL_j = Valoración booleana de lluvia en el día
n = número total de días del mes *i*

Primero se identificó si la serie era estacionaria o no estacionaria a partir de la prueba de Dickey-Fuller aumentada (Machiwal y Jha, 2012), para probar si es una hipótesis nula de un proceso con raíz unitaria y constante (Ecuación 4):

$$H_0: Y_t = \delta + Y_{t-1} + \varepsilon_t \qquad \text{Ecuación 4}$$

O si es un proceso estacionario alrededor de la tendencia puede decirse que es la hipótesis alterna Ecuación 5:

$$H_A: Y_t = \delta + \beta t + \phi Y_{t-1} + \varepsilon_t \qquad \text{Ecuación 5}$$

y se puede calcular de la siguiente manera Ecuación 6:

$$\Delta Y_t = \delta + \gamma Y_{t-1} + \beta_1 t + \sum_{i=2}^{p} \beta_i \Delta Y_{t-i+1} + \varepsilon_t \qquad \text{Ecuación 6}$$

Si la prueba $H_0: Y_t = 0$ contra $H_A: Y_t \neq 0$. Si no puede rechazarse la hipótesis nula (p-valor>0.05) entonces la serie es no estacionaria y posee una raíz de 1,

por el contrario, si se rechaza la hipótesis nula (p-valor<0.05), la serie es estacionaria y posee una raíz de 0.

Si la serie resultaba no estacionaria, entonces se removían las diferencias temporales restando la media promedio de la serie a cada dato, desestacionalizando la serie de tiempo y homologando la amplitud de los ciclos. La amplitud se calculó a partir del análisis de Fourier Ecuación 7 y Ecuación 8 (Machiwal y Jha, 2012):

$$cos_{\,i,j} = \sum_{k=1}^{n} \cos\left[\frac{2\pi(k-1)}{T}\right] v_{i,j,k} \qquad \text{Ecuación 7}$$

Donde:
$cos_{\,i,j}$ = coseno en el pixel del renglón i, columna j.
k = instante de tiempo en el que se evalúa el coseno
n = número total de instantes de tiempo
$v_{i,j,k}$ = valor de la variable v en el pixel i,j en el instante k.
T = número total de imágenes de la serie de tiempo

$$sen_{\,i,j} = \sum_{k=1}^{n} \text{sen}\left[\frac{2\pi(k-1)}{T}\right] v_{i,j,k} \qquad \text{Ecuación 8}$$

Donde:
$sen_{\,i,j}$ = seno en el pixel del renglón i, columna j
k = instante de tiempo en el que se evalúa el coseno
n = número total de instantes de tiempo
$v_{i,j,k}$ = valor de la variable v en el pixel i,j en el instante k
T = número total de imágenes de la serie de tiempo

Finalmente, las amplitudes generadas de cada imagen para todo el período, se sumaron obteniendo una amplitud general en la que se obtuvo si hubo un incremento o decremento en el comportamiento en los componentes de lluvia (Ecuación 9).

$$Amp_{i,j} = \alpha_{i,j} = \sqrt{cos_{i,j}^2 + sen_{i,j}^2} \qquad \text{Ecuación 9}$$

Donde:
$Amp_{\,i,j}$ = amplitud
$cos_{\,i,j}$ = coseno en el pixel del renglón i, columna j
$sen_{\,i,j}$ = seno en el pixel del renglón i, columna j

Todos los cálculos mencionados anteriormente se realizaron en el software de Matlab (MATLAB, 2016).

Para el análisis de cambio de uso de suelo, se usaron las Series II (1993) y VI (2014) de INEGI en el módulo *Land Change Modeler de TerrSet* (Clark Labs, 2016), el cual analiza las transiciones de un uso de suelo a otro por cada píxel donde primero se recategorizan los usos de suelo hasta quedar 9 categorías generales (Cuadro 1), siendo la cobertura anterior 1993 (Serie II) y la cobertura

posterior 2014 (Serie VI); dando como resultado el cambio entre todos los usos de suelo dentro del CACARL. Posteriormente, se organizaron las categorías de uso de suelo en ambas imágenes y se identificaron las transiciones entre el uso de suelo anterior y actual, para reconocer si persistió o cambió.

Cuadro 1. Recategorización de uso de suelo de las Serie II y Serie VI de INEGI

Sin vegetación aparente (Serie II y Serie VI)	Vegetación halófila hidrófila
Tular (Serie VI)	
Vegetación halófila hidrófila (Serie II)	
Zona urbana (Serie II)	Asentamiento Humano
Urbano construido (Serie VI)	
Cuerpo de agua (Serie II)	Cuerpo de agua
Agua (Serie VI)	
Agricultura de humedad anual (Serie II y Serie VI)	Agricultura de riego
Agricultura de riego anual (Serie II y Serie VI)	
Vegetación secundaria arbórea de bosque de oyamel (Serie II y Serie VI)	Bosque secundario
Vegetación secundaria arbórea de bosque de pino (Serie II y Serie VI)	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de encino (Serie II y Serie VI)	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de oyamel (Serie II y Serie VI)	
Vegetación secundaria arbustiva de bosque de pino (Serie II y Serie VI)	
Vegetación secundaria arbustiva de pino-encino (Serie II y Serie VI)	
Pastizal inducido (Serie II y Serie VI)	Pastizal
Pradera de alta montaña (Serie II y Serie VI)	
Bosque cultivado plantación forestal permanente (Serie II)	Bosque
Bosque de encino (Serie II y Serie VI)	
Bosque de encino-pino (Serie II y Serie VI)	
Bosque de oyamel (Serie II y Serie VI)	
Bosque de pino (Serie II y Serie VI)	
Bosque de pino-encino (Serie II y Serie VI)	
Bosque cultivado (Serie VI)	
Agricultura de temporal anual (Serie II y Serie VI)	Agricultura de temporal

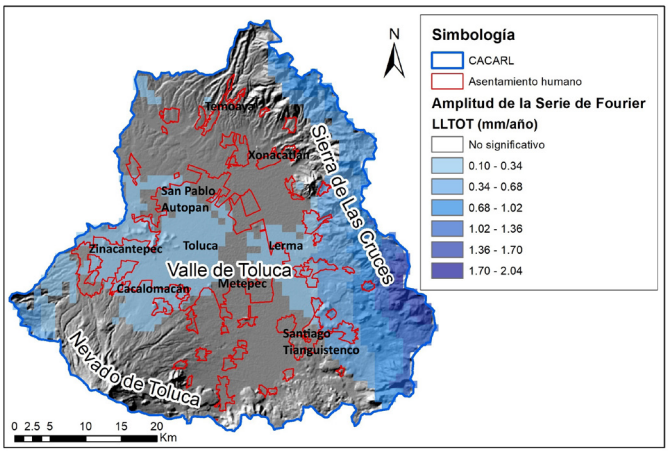
Fuente: elaboración propia con datos de INEGI.

Finalmente, para determinar si existían diferencias entre los cambios de uso de suelo y los cambios de amplitud con respecto a la LLTOT y NDLL, se utilizó la prueba de Turkey HSD en el software *StatGraphics* (*StatPoint Technologies, Inc.*, 2010).

2. Resultados

El componente de Lluvia Total Acumulada mostró tener lluvias significativas en la Sierra de las Cruces y la porción oeste del asentamiento humano. Sin embargo, en la porción este de la cuenca presentó incrementos de aproximadamente 0.68 mm con un máximo de 20.04 mm en las zonas más altas. Por otro lado, en la porción oeste del asentamiento humano se observa un incremento de 0.1 a 0.34 mm/año (Figura 2).

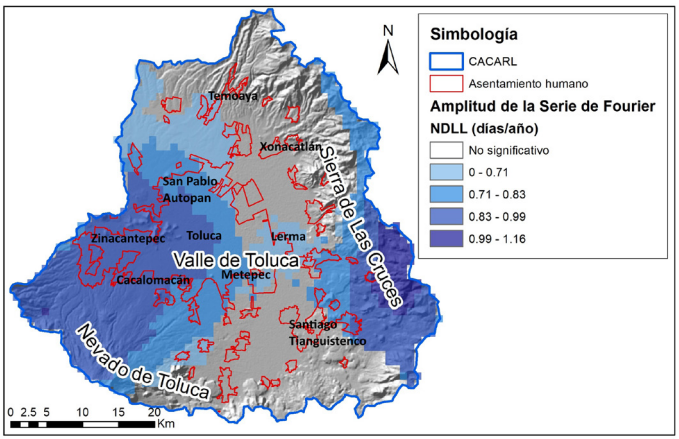
Figura 2. Mapa de amplitud de la Serie de Fourier de la Lluvia Total Acumulada



Fuente: elaboración propia.

El número de días con lluvia ha tenido un cambio significativo en gran parte de la cuenca, donde se notan incrementos en los días lluviosos en parte de la Sierra de las Cruces de aproximadamente un día por año. Otra zona en la que detectó incremento en los días de lluvia fue en los asentamientos humanos, principalmente en las laderas del volcán y centro de la ciudad de Toluca con un incremento cercano a un día/año (Figura 3)

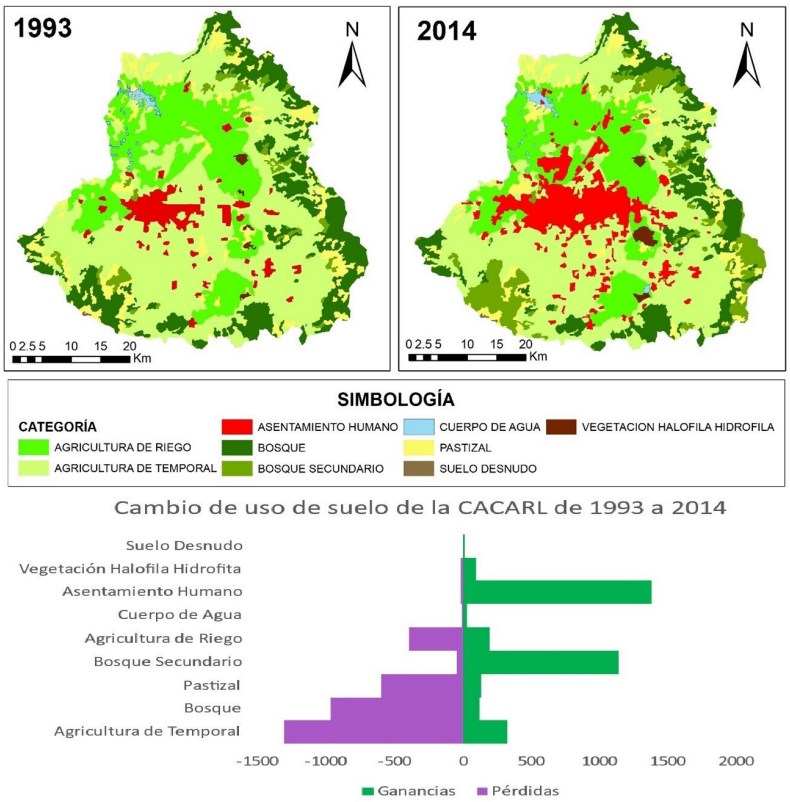
Figura 3. Mapa de amplitud de la Serie de Fourier del Número de Días con Lluvia



Fuente: elaboración propia.

Con el análisis de uso de suelo se obtuvo un cuadro, el cual muestra las ganancias y pérdidas, observando aumentos en área de los asentamientos humanos con más de 120 km², al igual que el área de bosques secundarios (120 km²). En contraparte el área de pastizal, bosque, agricultura de riego y agricultura de temporal han disminuido considerablemente (Figura 4).

Figura 4. Ganancias y pérdidas en Km² entre 1993 y 2014 en el CACARL



Fuente: elaboración propia.

Se obtuvo la matriz de cambio entre las 9 categorías que se generaron, la cual se muestra qué categoría cambio, cuánto y, además a qué otra categoría cambió (Cuadro 2). Entre los resultados que arrojó el módulo, fue el índice de concordancia *Kappa* entre las dos imágenes de manera general y por categoría, obteniendo así un índice global de 0.86.

Cuadro 2. Cuadro cruzado de 9 categorías de uso de suelo en la Cuenca Alta del CARL de 1993 a 2014 en Km² (En negritas áreas mayores a 100 Km² con cambio)

Categoría (Km²)	Agricultura de temporal	Bosque	Pastizal	Bosque secundario	Agricultura de riego	Cuerpo de agua	Asentamiento humano	Vegetación halófila hidrófila	Suelo desnudo
Agricultura de temporal	15261*	114	426	39	34	1	34	0	0
Bosque	52	4524*	161	29	0	0	0	0	0
Pastizal	62	79	2474*	30	65	1	0	22	0
Bosque secundario	279	1752	235	846*	0	0	0	0	0
Agricultura de riego	141	2	192	0	6805*	18	6	15	0
Cuerpo de agua	3	0	16	0	30	197*	0	0	0
Asentamiento humano	2091	4	74	0	580	0	1794*	0	0
Vegetación halófila hidrófila	3	0	84	0	94	0	0	101*	0
Suelo desnudo	0	0	11	0	0	0	0	0	11*

Fuente: elaboración propia.

*Áreas sin cambio de uso de suelo

Los usos de suelo que presentaron mayores cambios fueron: agricultura de temporal, bosque, pastizal y agricultura de riego, viéndose mayormente afectada la agricultura de temporal con una pérdida total aproximada de 2,511 Km2; seguido por el bosque con una pérdida total de 1,866 Km² y pastizal que perdió 1,014 Km² aproximadamente. En seguida se muestra el cuadro 3 de las pérdidas significativas y qué uso de suelo las ganó.

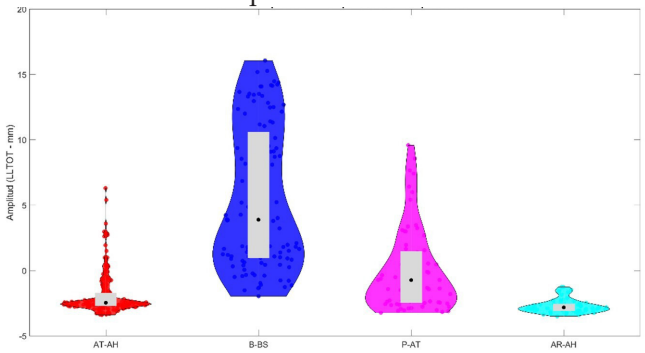
Cuadro 3. Pérdidas (Serie II) y ganancias (Serie VI) de uso de suelo de 1993 a 2014 con datos tomados de INEGI

Serie II (1993)	Serie VI (2014)	Área en Km²
Agricultura de temporal	Bosque secundario	279
	Agricultura de riego	141
	Asentamiento humano	2091
Bosque	Agricultura de temporal	114
	Bosque secundario	1752
Pastizal	Agricultura de temporal	426
	Bosque	161
	Bosque secundario	235
	Agricultura de riego	195
Agricultura de riego	Asentamiento humano	580

Fuente: elaboración propia.

En la figura 5 se muestran los usos de suelo que cambiaron de 1993 a 2014 en amplitud de LLTOT (Lluvia Total mensual) en el CACARL (Figura 5). La prueba de Tukey HSD indicó el comportamiento de la amplitud de LLTOT en los usos de suelo que cambiaron de agricultura de riego (AR) y agricultura temporal (AT) para asentamiento humano (AH), no diferencias (M = -2.71 y M = -1.89 respectivamente). Sin embargo, cuando el cambio es de pastizal (P) a agricultura de temporal (AT), la puntuación media para la condición de LLTOT es significativamente diferente a las condiciones de B a BS (M = 5.50), al igual que P/AT (M = -0.05). En conjunto, estos resultados sugieren el cambio de uso de suelo a asentamiento humano con un efecto mayor sobre el comportamiento de la lluvia total mensual, disminuyendo la precipitación en éste; mientras que en el cambio de uso de suelo de bosque (B) a bosque secundario (BS) se incrementaron las precipitaciones.

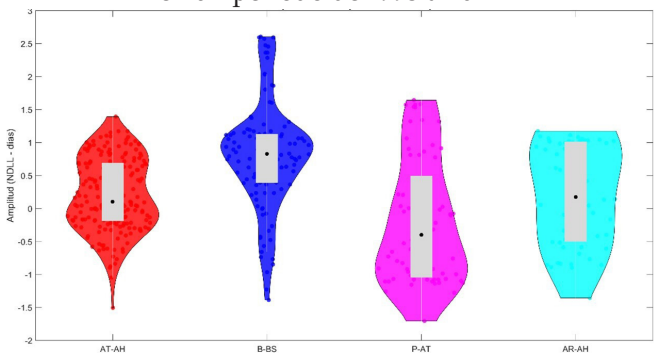
Figura 5. Variación de amplitud de la LLTOT por uso de suelo que cambió en un período de 1993 a 2014



Fuente: elaboración propia.

Los usos de suelo que cambiaron las amplitudes de NDLL (Número de Días con Lluvia) en el CACARL de 1993 a 2014 se muestran en la prueba de Kruskal-Wallis, donde se obtuvo una diferencia entre los rangos promedios. En la prueba de Tukey HSD se identificó que el comportamiento de la amplitud del NDLL en los usos de suelo que cambiaron de AT y AR a AH, no existen diferencias (M = 0.20 y M = 0.23 respectivamente). No obstante, los cambios de uso de suelo de P/AT (M = -0.18) y B/BS (M = 0.80) son sustancialmente diferentes. Con esto, los resultados sugieren que el cambio de uso de suelo a asentamiento humano ha influido en el comportamiento en el número de días con lluvia total mensual, aumentando el promedio de días con lluvia con un mayor incremento en el cambio de uso de suelo de bosque a bosque secundario (Figura 6).

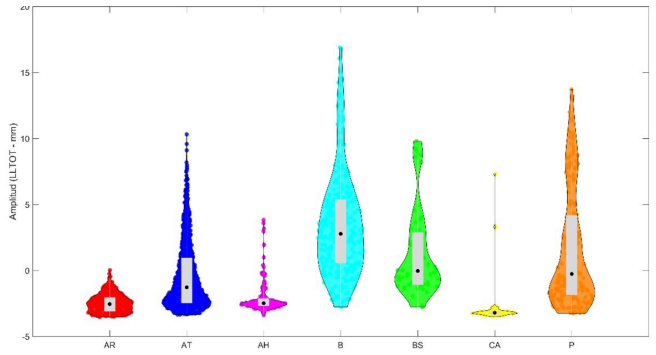
Figura 6. Variación de amplitud del NDLL por uso de suelo que cambió en un período de 1993 a 2014



Fuente: elaboración propia.

En la Figura 7 se muestran los usos de suelo que permanecieron de 1993 a 2014 para las amplitudes de LLTOT en el CACARL. La prueba de Tukey HSD indicó que el comportamiento de la amplitud de la LLTOT en los usos de suelo de cuerpo de agua (CA) (M = -2.80), AR (M = -2.48) y AH (M = -2.04), no existen diferencias ni tampoco hay diferencias entre BS (M = 1.35) y P (M = 1.63). Existen diferencias en los usos de suelo de AT (M = -0.40) y B (M = 3.55). Los resultados sugieren que en los usos de suelo que permanecieron tales como AR, AT, AH y CA la lluvia total mensual disminuyó, mientras que en los usos de suelo de B, BS y P la lluvia incrementó.

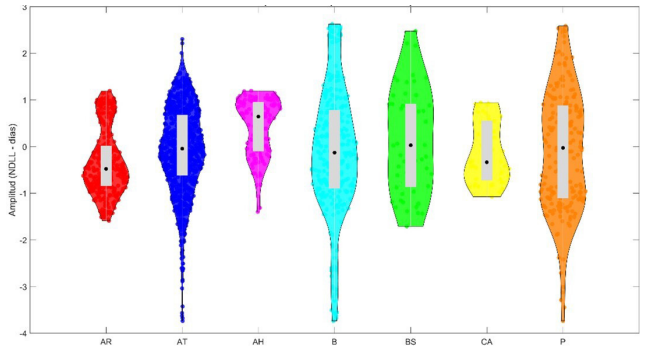
Figura 7. Variación de amplitud de LLTOT por uso de suelo que permaneció en un período de 1993 a 2014



Fuente: elaboración propia.

Para la amplitud de NDLL (Número de Días con Lluvia) en los usos de suelo que permanecieron de 1993 a 2014 (Figura 8) la prueba de Kruskal Wallis resultan diferencias entre los rangos promedios. La prueba de Tukey HSD indicó que no existen diferencias entre los usos de suelo de AR (M = -0.33), CA (M = -0.14), B (M = -0.10) y P (M = -0.09); además que tampoco existen diferencias entre CA, B, P, AT (M =-0.06) y BS (M = 0.14), de igual manera no existen diferencias entre BS y AH (M = 0.40). Puede decirse que existen diferencias en los usos de suelo de AR con AT, AH y BS; AT con AH y AH tiene diferencias con B, CA y P. Estos resultados en conjunto, muestran tres grupos homogéneos relacionados entre sí, el primero agrupa cuatro usos de suelo (AR, CA, B y P); el segundo agrupa cinco, de los cuales tres son del primer grupo (CA, B, P, AT y BS) y, el último grupo, está formado por dos usos de suelo de los cuales uno pertenece al segundo grupo (BS y AH). En los dos primeros grupos el comportamiento de la amplitud de los NDLL disminuye, mientras que el tercer grupo tiende a incrementar.

Figura 8. Variación de amplitud de NDLL por uso de suelo que permaneció en un período de 1993 a 2014



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

El estudio realizado al CACARL permitió conocer el comportamiento de los componentes de precipitación en los usos de suelo que cambiaron y permanecieron dentro de la cuenca. Por medio de esta investigación, se concluyeron los componentes de lluvia (LLTOT y NDLL) mostraron un incremento significativo sobre la Sierra de las Cruces; también se observó la porción oste de la ZMVT ha tenido cambios significativos en cuanto al incremento de la lluvia en milímetros y en número de días. Aunado a esto, el comportamiento de la lluvia total mensual y el número de días con lluvia, también se obtuvieron un comportamiento positivo en el uso de suelo de bosque secundario y a pesar

de que la lluvia disminuyó en asentamiento humano el número de días en promedio amentaron.

El cambio de uso de suelo ha sido constante y unos han sido remplazados en mayor área con respecto a otros, viéndose beneficiado principalmente el asentamiento humano, ocupando usos de suelo que eran destinados a la agricultura, estas últimas se desplazaron a pastizales y bosques, generando pérdidas en cadena.

La variabilidad climática se ha visto influenciada reciamente por la fuerte necesidad del hombre por alterar el medio a su conveniencia con el fin de satisfacer sus necesidades, fragmentando las coberturas de uso de suelo. En el caso del CACARL su mayor cambio se debió a la gran influencia del crecimiento de la ciudad por el auge de la industrialización (Botello, 2005; Flores y Cenecorta, 2015), en sus inicios el principal uso de suelo era agrícola (Venancio, 2016). Estos cambios ocurrieron en varias ciudades impulsadas por el crecimiento económico (BELLET, 2018; López, 2019; Serrano Besil, 2020).

Por lo anterior, es necesario dar prioridad a la forma de planificar el uso de suelo con la intención de implementar medidas que permitan un manejo sostenible de los recursos, que al final, proporciona beneficios al mejoramiento de la calidad de vida, a la par de mejorar la calidad ambiental. De igual manera, es necesario hacer énfasis en las investigaciones que solo buscan determinar las causas y consecuencias de distintos fenómenos, sino que también buscan aportar formas de cómo reducir o mitigar su impacto.

Agradecimientos

Al Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA) y al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por brindarnos a los mejores profesores y por la beca otorgada respectivamente. Finalmente, agradecemos al Dr. José Emilio Baro Suarez y al Dr. Alexis Ordaz Hernández por permitirnos aportar este capítulo al libro.

Bibliografía

Acheampong, M., Yu, Q., Enomah, L. D., Anchang, J., y Eduful, M. (2018). Land use/cover change in Ghana's oil city: Assessing the impact of neoliberal economic policies and implications for sustainable development goal number one – A remote sensing and GIS approach. *Land Use Policy*, 73, 373-384. https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.02.019

Banchero, S., Abelleyra, D. d, Veron, S. R., Mosciaro, M. J., Arévalos, F., y Volante, J. N. (2020). Recent Land Use and Land Cover Change Dynamics in the Gran Chaco Americano. *2020 IEEE Latin American GRSS ISPRS Remote Sensing Conference* (LAGIRS), 511-514. https://doi.org/10.1109/LAGIRS48042.2020.9165579

BELLET, E. O. Y. C. (2018). *¿Cambio de modelo? Expectativas de crecimiento urbano en áreas urbanas articuladas por ciudades medias. Algunos casos de estudio. Ciudades medias y áreas metropolitanas. De la dispersión a la regeneración*, 15, 117.

Botello, N. A. (2005). Los estudios sobre la zona metropolitana del valle de Toluca. Aproximaciones estructurales y centradas en los actores. *Región y Sociedad*, XVIII.

Clark Labs. (2016). *TerrSet. Versión 18.21*. Clark University. Massachusetts, USA.

CONAGUA, (Comisión Nacional del Agua). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero del Valle de Toluca (1501)*. Diario Oficial de la Federación.

Danilo, A., y Díaz, C. (2000). *Sequía en un mundo de agua.*

Flores, A. V., y Cenecorta, A. I. (2015). Gobernanza metropolitana como estrategia para planificar y gestionar el desarrollo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. *Revista de estudios regionales*, 102, 91-118.

Geografía (INEGI), I. N. de E. y. (s. f.). *Mapas. Uso de suelo y vegetación. Instituto Nacional de Estadística y Geografía.* INEGI. https://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo/

Li, H., Wolter, M., Wang, X., y Sodoudi, S. (2018). Impact of land cover data on the simulation of urban heat island for Berlin using WRF coupled with bulk approach of Noah-LSM. *Theoretical and Applied Climatology, 134*(1), 67-81. https://doi.org/10.1007/s00704-017-2253-z

López, G. A. (2019). Las ciudades medias industriales en España: Evolución histórica, proceso de urbanización y estructura urbana. Ería: *Revista cuatrimestral de geografía, 39*(1), 25-49.

Machiwal, D., y Jha, M. K. (2012). H*ydrologic time series analysis: Theory and practice.* Springer Science y Business Media.

MATLAB (2016). *Versión 9.1.0.441655 (R2016b).* Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc.

Méndez-Lemus, Y. (2015). Vieyra, A. y A. Larrazábal (coords.; 2014), Urbanización, Sociedad y Ambiente: Experiencias en ciudades medias, CIGA-UNAM, SEMARNAT, INECC, México, 293 p., ISBN 978-607-02-4403-2. *Investigaciones Geográficas*. https://doi.org/10.14350/rig.46422

Rwanga, S. S., y Ndambuki, J. M. (2017). Accuracy Assessment of Land Use/Land Cover Classification Using Remote Sensing and GIS. *International Journal of Geosciences, 08*(04), Art. 04. https://doi.org/10.4236/ijg.2017.84033

Sahagún-Sánchez, F. J., y Reyes-Hernández, H. (2018). Impact of land use cover change on protected natural areas in central region of Sierra Madre Oriental, Mexico. *CienciaUAT, 12*(2), 6.

Serrano Besil, J. E. (2020). Crecimiento y configuración socioespacial de ciudades

petroleras: Los casos de Barrancabermeja (Colombia) y Comodoro Rivadavia (Argentina), 1907-1938. *Cuadernos de historia (Santiago)*, 52, 205-232.

StatPoint Technologies, Inc. (2010). *STATGRAPHICS Centurion XVI. Versión 16.1.03.*

Thornton, M. M., Thornton, P. E., Wei, Y., Mayer, B. W., Cook, R. B., y Vose, R. S. (2016). *DaymetDaymet: Monthly Climate Summaries on a 1-km Grid for North America, Version 3. 214516.6730769998 MB*. https://doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1345

Venancio, A. (2016). Planificación y gestión del desarrollo de la Zona Metropolitana del Valle de Toluca. *Un Análisis desde la gobernanza, 2005-2012*. Pág. (33-227), 5.

Villarreal, D., y Candanedo, M. (2020). Efecto de las islas de calor urbano en las principales vías de la Ciudad de Panamá. *I+D Tecnológico, 16*(2). https://doi.org/10.33412/idt.v16.2.2829

Zavaleta-Palacios, M., Díaz-Nigenda, E., Vázquez-Morales, W., Morales-Iglesias, H., y Lima, G. N. de. (2020). Urbanización y su relación con la isla de calor en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios, 7*(2), Art. 2. https://doi.org/10.19136/era.a7n2.2485

Capítulo 17. Estimación de la recarga potencial en el acuífero del Valle de San Juan del Río, Querétaro

Arianna Valle González [1]
Hector Uriel Zaragoza Contreras [2]
José Luis Expósito Castillo [3]
María Vicenta Esteller Alberich [4]

Introducción

El agua subterránea es parte fundamental del ciclo hidrológico y del medio ambiente, su papel es crucial en el sostenimiento de ecosistemas y para el desarrollo de diferentes actividades humanas, ya que proporcionan casi el 50% del agua potable (UNESCO y IWSSM, 2021). A nivel mundial del volumen total que se extrae, el 69% se destina al sector agrario, el 22% para uso doméstico y el 9% para uso industrial, estos porcentajes varían según la región (UNESCO, 2022).

La importancia que desempeña el agua subterránea en México permite el crecimiento socioeconómico del país. Sus características físicas admiten aprovechamientos de manera versátil. En este caso, funciona como almacenamiento y red de distribución, pues se extrae agua en cualquier época del año y en diferentes puntos de un acuífero; los cuales funcionan como filtros purificadores, preservando la calidad del agua (SEMARNAT y CONAGUA, 2021).

1 Maestra en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA)-Universidad Autónoma del Estado de México.

2 Maestro en Ciencias del Agua. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA)-Universidad Autónoma del Estado de México.

3 Doctor en Ingeniería. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA)-Universidad Autónoma del Estado de México.

4 Doctora en Ciencias Geológicas. Instituto Interamericano de Tecnología y Ciencias del Agua (IITCA)-Universidad Autónoma del Estado de México.

El país está dividido en 653 acuíferos para la administración del agua subterránea, de los cuales 111 se encuentran en condición de sobreexplotación; esto en función de la relación entre el volumen de extracción total por bombeo y la recarga total determinado a partir de los datos correspondientes al balance de aguas media anual de agua (CONAGUA, 2021).

De acuerdo con Custodio (2002) se suele considerar un acuífero sobreexplotado cuando se perciben algunos efectos negativos como: descenso continuo del nivel de agua subterránea, deterioro gradual de su calidad y aumento en los costos de extracción o daños ecológicos. La sobreexplotación de acuíferos es el resultado de diferentes problemáticas en torno a la gestión de los recusos hídricos subterráneos, lo cual, requiere en primer lugar, actualizar el conocimiento hidrogeológico de los sistemas de las aguas subterráneas, que es fundamental para el uso sostenible de este recurso y asegurar la calidad y cantidad del recurso (Vélez, *et al.*, 2020).

De acuerdo con la CONAGUA (2020), el acuífero del Valle de San Juan del Río presenta un deficit de -136.26 Mm^3, es decir, se extrae agua a costa del almacenamiento no renovable del acuífero, donde la mayor cantidad de agua subterránea extraida se utiliza para el consumo humano y la agricultura. La problemática en el acuífero se debe a una extracción intensiva, capaz de ocasionar efectos adversos como hundimientos y agrietamientos del terreno o escasez del agua que potencialmente conlleva a conflictos sociales en la región; ya que el acuífero es la principal fuente de abastecimiento para los habitantes, permite el desarrollo económico de la entidad.

Con lo anterior, resulta evidente la necesidad de tomar acciones que permitan un manejo sustentable del acuífero. Como primer paso se debe estimar su tasa de recarga anual con los datos disponibles recientes. De acuerdo con Healy (2010) la recarga de agua subterránea puede ser definida como el flujo de agua que llega a la superficie freática constituyendo una adición al almacenamiento del agua subterránea en México. De acuerdo con el Diario Oficial de la Federación (DOF, 2015), la recarga corresponde al volumen de agua que recibe un acuífero en un período estabecido. Dado que no existen métodos directos de estimación de la recarga, surge la necesidad de determinar un valor a partir de diferentes métodos indirectos los cuales presentan límitaciones de distinta naturaleza. Entre ellos encontramos el método de balance hídrico que es una contabilización de los movimientos de entrada, salida y cambios de almacenamiento dentro de un volumen de control. Este método es universal y adaptable a cualquier sistema hidrológico, además representa la mayor clase de técnicas para estimar la recarga (Healy, 2010).

La presente investigación, tiene la finalidad de estimar la recarga del acuífero del Valle de San Juan del Río. Mediante el método que mejor se adapte a sus características hidrogeológicas y con base en la extenuante búsqueda

y comparación con otros métodos de balance hídrico; además del apoyo del software de Sistemas de Información Geografica (SIG).

1. Zona de estudio

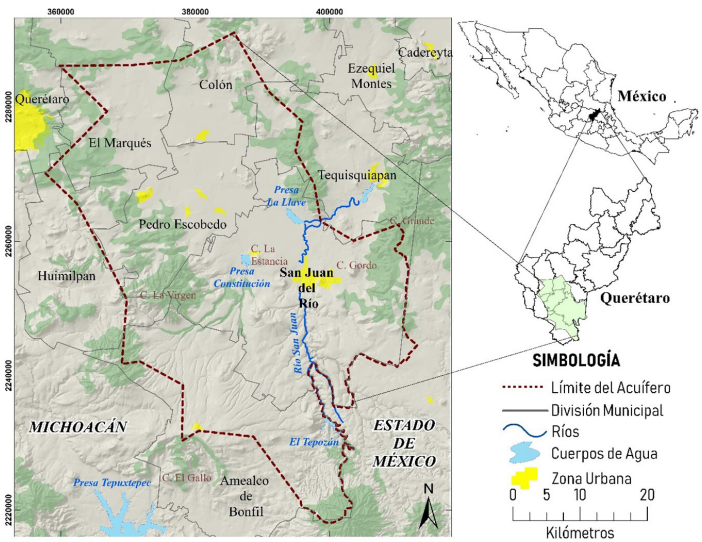
El acuífero del Valle de San Juan del Río se localiza al sureste del estado de Querétaro, comprendiendo una extensión territorial de 2,264.48 km². Abarca parte de los municipios de San Juan del Río, Tequisquiapan, Colón, Pedro Escobedo, Huimilpan, Amealco y El Marqués (CONAGUA, 2020) (figura 1). El valle del acuífero tiene una elevación de 1,920 msnm (Medina, 2017). El clima predominante es de tipo semiseco y cálido donde la temperatura media anual en promedio es de 16° C con un rango de 14 y 18° C. Por su parte, la precipitación media anual es de 650 mm (CONABIO, 2010).

1.1 Entorno hidrogeológico

El acuífero pertenece a la Región Hidrológica No. 26, Río Pánuco, en la subdivisión Alto Pánuco, Cuenca del río San Juan (Antares, 2008). Desde el punto de vista hidrogeológico, pertenece al acuífero Valle de San Juan del Río (2203) en la provincia a fisiográfica del Eje Neovolcánico Transversal, en la subprovincia Llanuras y Sierras de Querétaro e Hidalgo (CONAGUA, 2020).

El SGM (2010) indica que el acuífero del Valle de San Juan del Río se caracteriza por ser de tipo libre que comprende principalmente dos unidades hidrogeológicas (figura 2).

Figura 1. Ubicación del área de estudio



Fuente: elaboración propia.

La primera tiene una permeabilidad alta (de 10^{-1} a 10^{-2} cm/s) y está conformada por las unidades geológicas andesitas y basaltos del Plioceno-Cuaternario (Tpl QA-B), basaltos del Pleistoceno (Qpt B). La permeabilidad alta se debe su intenso fracturamiento, donde se extrae la mayor parte de agua subterránea del acuífero, sin embargo, cuando la unidad se encuentra en superficie opera como zona de recarga. Esta unidad se concentra principalmente al extremo sureste del acuífero, específicamente al sur y suroeste de la ciudad de San Juan del Río, presenta afloramientos aislados al sur y oriente del acuífero.

La segunda unidad tiene una permeabilidad baja (de 10^{-5} a 10^{-10} cm/s). Se conforma por riolitas del Mioceno (Tm R), tobas dacíticas del Mioceno-Plioceno (Tmpl TDa), andesitas y dacitas del Plioceno (Tpl A-Da), así como tobas riolíticas y dacíticas también del Plioceno (Tpl Tr-TD). En esta unidad predomina el material arcilloso como matriz, generando una permeabilidad baja, aunque en zonas puntuales su matriz es arenosa. La distribución de esta unidad cubre prácticamente toda la zona del valle, con excepción de la zona norte y sur de la ciudad de San Juan del Río.

2. Metodología

El proceso metodológico consta de cuatro etapas principales: 1) Recopilación de la información, 2) selección del método para la estimación de la recarga, 3) estimación de la recarga por el método seleccionado y 4) discusión de los resultados. Durante el desarrollo de las etapas metodológicas fue imprescindible el uso del software de los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

2.1 Recopilación de la información

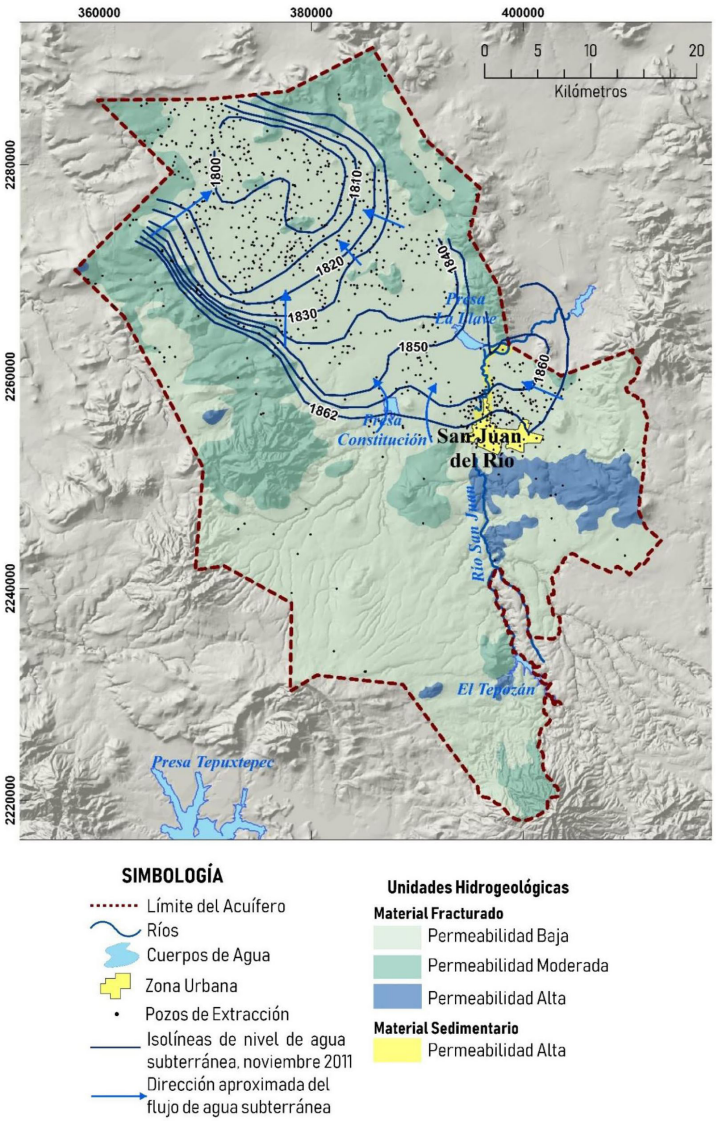
Consistió principalmente en la búsqueda bibliográfica de informes técnicos y estudios hidrogeológicos referentes al área de estudio. Así como de la revisión y análisis de diversas metodologías en revistas arbitradas e indexadas que estimaran el balance hídrico. Una fuente fundamental para la obtención de la información de la zona fue el Comité Técnico de Aguas Subterráneas del acuífero del Valle de San Juan del Río (COTAS San Juan del Río); esta etapa también se apoyó en diferentes fuentes públicas e institucionales.

2.2 Selección del método para estimar la recarga

La selección del método para estimar la recarga en el acuífero del Valle de San Juan del Río, se basó en el análisis y evaluación de las diferentes metodologías, se consideran los costos de su implementación, el tiempo de realización y la escala de trabajo. Bajo estos criterios, los siguientes métodos se asumen adecuados para estimar la recarga:

- Balance hídrico del suelo.
- Balance de masa de cloruros.
- Balance de agua de acuerdo con la NOM-011-CONAGUA-2015.

Figura 2. Mapa de hidrogeológico del área de estudio (Medina, 2017)



Fuente: elaboración propia.

El balance hídrico del suelo, muestra la relación entre las entradas y las salidas al sistema, considerando las variables de precipitación, evapotranspiración, escorrentía y cambio de almacenamiento, cuya obtención no representa mayor dificultad; además el método es sencillo de implementar.

Otro método propuesto fue el de balance de masa de cloruros que emplea dicho ion debido a su abundancia en la precipitación. Este determina el flujo de masa de cloruro que precipita y después se infiltra hasta llegar a zona saturada, de esta manera se estima la recarga al acuífero.

Finalmente, la NOM-011-CONAGUA-2015, muestra el método de balance hídrico que determina la disponibilidad media anual del agua subterránea en el acuífero donde utiliza las entradas y salidas para estimar el volumen de agua almacenada. Se considera una metodología con diversas ventajas ya que los insumos se obtienen de los antecedentes, además de no ser necesario realizar monitoreos en campo por lo cual resulta económico.

2.3 Estimación de la recarga por el método seleccionado

De acuerdo con la NOM-011-CONAGUA-2015 la recarga total que recibe un acuífero en un período establecido se determina por medio del balance del acuífero, representado en la ecuación 1.

$$R_t = D_t \pm \Delta S \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde, R_t es la recarga total, D_t es la descarga total y ΔS es el cambio de almacenamiento del acuífero. De acuerdo con la ecuación 1, las entradas y salidas de un acuífero están presentadas en la ecuación 2.

$$Rv + Eh + Ri - Sh - B = \pm\Delta S \qquad \text{Ecuación 2}$$

Donde las entradas están conformadas por la recarga natural, la cual puede ocurrir por dos vías, mediante la recarga vertical (*Rv*) y mediante flujos subterráneos (*Eh*) y de forma artificial a través de la recarga inducida (*Ri*). Las salidas están conformadas por las descargas naturales mediante flujo subterráneo (*Sh*) y artificiales a través de pozos de bombeo (B). ΔS es el cambio de almacenamiento del acuífero y corresponde al volumen de agua que gana o pierde un acuífero en un período establecido, a partir de la evolución de los niveles de agua subterránea y valores representativos del coeficiente de almacenamiento del acuífero (*Sy*).

2.4 Estimación del área del valle

Se delimitó un área de balance del acuífero (*A*), la cual contiene una mayor concentración de aprovechamientos de agua subterránea, así como pozos de observación. Esta área se define con ayuda del software de SIG *ArcMap*, to-

mando en cuenta los criterios topográficos (curvas de nivel), geológicos e hidrogeológicos, así como la poligonal administrativa del acuífero; los pozos de observación con información y de extracción inscritos ante el Registro Público de Derechos de Agua (REPDA).

2.5 Delimitación de la temporalidad

A partir del análisis en las variaciones en la precipitación y la profundidad del nivel estático a partir del año de 1992 al 2017, se consideraron períodos de estiaje y lluvias, ya que un período de estiaje prolongado podría reflejar un descenso en el nivel piezométrico, así uno de lluvias extraordinario podría reflejar recuperación del mismo.

Además, se considera la disponibilidad de la información del volumen de descarga del acuífero, las mediciones del nivel piezométrico en pozos de observación y estimaciones previas en el área de estudio para poder comparar los resultados.

2.6 Descargas del acuífero

De acuerdo con la NOM-011-CONAGUA-2015, la descarga de un acuífero puede ocurrir de forma natural a través de manantiales, caudal base, flujos subterráneos y evapotranspiración, de forma artificial mediante pozos de bombeo. En el acuífero del Valle de San Juan del Río, la descarga se produce mediante pozos de extracción. En este sentido, se consideraron las concesiones de extracción del agua subterránea otorgadas en el acuífero. Estos volúmenes fueron retomados de estudios previos como Medina (2017).

2.7 Estimación del cambio de almacenamiento (ΔS) y la recarga del acuífero

La obtención del cambio del almacenamiento del acuífero se realizó mediante dos técnicas: A) mediante el promedio aritmético y B) mediante el trazado de polígonos de evolución piezométrica. Por ello, se analizaron 55 pozos de observación, cuya distribución espacial en el valle del acuífero de manera homogénea permitiría observar la viabilidad de la implementación de estas técnicas, ya que ambas requieren una adecuada distribución en el área del valle.

A) Promedio aritmético

Inicialmente, se examinaron los datos de profundidad del nivel en cada pozo de observación y tomando en cuenta aquellos pozos que tienen continuidad en las mediciones de profundidad del nivel año con año en la temporalidad del balance establecida. La evolución del nivel de agua subterránea se obtuvo mediante la ecuación 3.

$$Evolución\ del\ nivel = Ni - Nf \qquad \text{Ecuación 3}$$

Donde *Ni* corresponde a la profundidad del nivel del año inicial (en metros) y *Nf* es la profundidad del nivel del año final (m) del período en análisis. Si los niveles descienden (abaten) existirá un volumen de roca drenada (*Vrd*), por el contrario, si los niveles se elevan se obtendrá un volumen de roca saturada (*Vrs*).

Dicho lo anterior, se realizó la sumatoria de todos los valores de evolución del nivel piezométrico y, posteriormente se obtuvo el promedio de los pozos seleccionados después de determinar el promedio anual de las sumatorias de evolución de cada período mediante la ecuación 4 para el caso de abatimientos y, la ecuación 5 para el caso de elevación del nivel.

$$Abp = \frac{\Sigma\ Abatimientos/\ Np}{Na} \qquad \text{Ecuación 4}$$

Donde *Abp* es el abatimiento promedio (m), *Σ Abatimiento*s es la sumatoria de todos los abatimientos (m), *Np* el número total de pozos y *Na* el número de años del período evaluado.

$$Elevp = \frac{\Sigma\ Elevaciones/\ Np}{Na} \qquad \text{Ecuación 5}$$

Donde *Elevp* es la elevación promedio (m), *Σ Elevación* la sumatoria de todas las elevaciones (m), Np es el número total de pozos y Na el número de años del período evaluado.

Posteriormente, el promedio anual se multiplicó por el área del valle (*A*) (m^2) y, finalmente, para obtener el cambio de almacenamiento (ΔS), los valores previos se multiplicaron por el coeficiente de almacenamiento (*Sy*) establecido para el acuífero (ecuaciones 6 y 7).

$$\Delta S = Vrd \times Sy \qquad \text{Ecuación 6}$$

Donde ΔS es el cambio de almacenamiento para el período establecido (m^3), Vrd el volumen de roca drenada (m^3) y Sy el coeficiente de almacenamiento.

$$\Delta S = Vrs \times Sy \qquad \text{Ecuación 7}$$

Dónde, ΔS es el cambio de almacenamiento para el período establecido (m3), Vrs el volumen de roca saturada (m^3) y Sy el coeficiente de almacenamiento.

B) Polígonos de evolución piezométrica

Esta técnica determina la evolución piezométrica en cada uno de los pozos de observación mediante la ecuación 3 y, posteriormente, trazar las isolíneas de evolución piezométrica mediante el método del trazado de isolíneas con apoyo de unidades hidroestratigráficas del acuífero. Después, las isolíneas de evolución piezométrica son digitalizadas en software de SIG en forma de polígonos para obtener el área en m^2.

Si los niveles descienden (abaten) existen un volumen de roca drenada (Vrd), por el contrario, si los niveles se elevan se obtendrá un volumen de roca saturada (Vrs). En las ecuaciones 8 y 9 se indica la manera de determinar cada caso.

$$Vrd = A \times Abp \qquad \text{Ecuación 8}$$

Donde Vrd es el volumen de roca drenada por el descenso del nivel piezométrico (m^3), A el área del polígono de evolución piezométrica (m^2) y Abp el abatimiento promedio del nivel piezométrico (m).

$$Vrs = A \times Elevp \qquad \text{Ecuación 9}$$

Donde Vrs es el volumen de roca saturada por el descenso del nivel piezométrico (m^3), A el área del polígono de evolución piezométrica (m^2) y $Elevp$ la elevación promedio del nivel piezométrico (m).

Posteriormente se obtuvo el volumen de roca drenada o saturada para el período del balance establecido mediante las ecuaciones 10 y 11.

$$Vrd\ anual = Vrd/N \qquad \text{Ecuación 10}$$

Donde Vrd anual es el promedio de la evolución piezométrica, Vrd el volumen de roca drenada (m^3) y N corresponde al número de años del período en análisis.

$$Vrs\ anual = Vrs/N \qquad \text{Ecuación 11}$$

Donde Vrs anual es el promedio de la evolución piezométrica, Vrs el volumen de roca saturada (m^3) y N corresponde al número de años del período en análisis.

Con base en lo anterior, el cambio de almacenamiento (ΔS) de cada polígono de evolución fue obtenido mediante las ecuaciones 12 y 13.

$$\Delta S = Vrd \times Sy \qquad \text{Ecuación 12}$$

Donde ΔS es el cambio de almacenamiento (m^3), Vrd el volumen de roca drenada promedio (m^3) y Sy es el coeficiente de almacenamiento de las unidades hidroestratigráficas en las cuales se encuentran los polígonos de evolución piezométrica

$$\Delta S = Vrs \times Sy \qquad \text{Ecuación 13}$$

Donde ΔS es el cambio de almacenamiento (m^3), Vrd el volumen de roca saturada promedio (m^3) y Sy el coeficiente de almacenamiento de las unidades hidroestratigráficas en las cuales se encuentran los polígonos de evolución piezométrica.

Una vez determinado el cambio de almacenamiento (ΔS) del área de balance del acuífero por ambas vías y establecido el volumen de descarga para cada período, se aplica la ecuación de balance del acuífero establecida en la NOM-011-CONAGUA-2015 (Ecuación 1) para estimar la recarga total del acuífero del Valle de San Juan del Río.

3. Resultados

3.1 Recopilación de la información

De acuerdo con el Registro Publicó de Derechos de Agua (REPDA) (CONAGUA, 2019), en el acuífero Valle de San Juan del Río se reportaron 865 pozos de extracción. Además, 55 pozos de observación proporcionados por el COTAS del acuífero del Valle de San Juan del Río con mediciones en la profundidad del nivel estático para diferentes años (1992 - 2017), y un censo de extracción del agua subterránea del año 2016. La información fue homologada al sistema de coordenadas geográficas UTM, proyección WGS 1984 Zona 14 y posteriormente procesada en el software de SIG *ArcMap* 10.4.

3.2 Selección del método para estimar la recarga

Con base en los objetivos de la investigación y los criterios determinados para la selección de un método que estime la recarga en el acuífero del Valle de San Juan del Río, se seleccionó el método de balance hídrico establecido en la NOM-011-CONAGUA-2015, ya que los insumos pueden obtenerse mediante la aplicación de metodologías establecidas, además, se dispone de información hidrogeológica del acuífero, incluyendo la evolución de los niveles de agua subterránea para diferentes temporalidades que no requiere costos elevados para su implementación ni visitas frecuentes a campo.

3.3 Estimación de la recarga por el método seleccionado

Para obtener la recarga (R_t) por el método establecido en la NOM-011-CONAGUA-2015 en el que se estima a partir del cambio de almacenamiento (ΔS) y los volúmenes de descarga en el acuífero (D_t) un período establecido. A continuación, se describe cada uno de los resultados obtenidos en cada etapa.

3.4 Área del valle

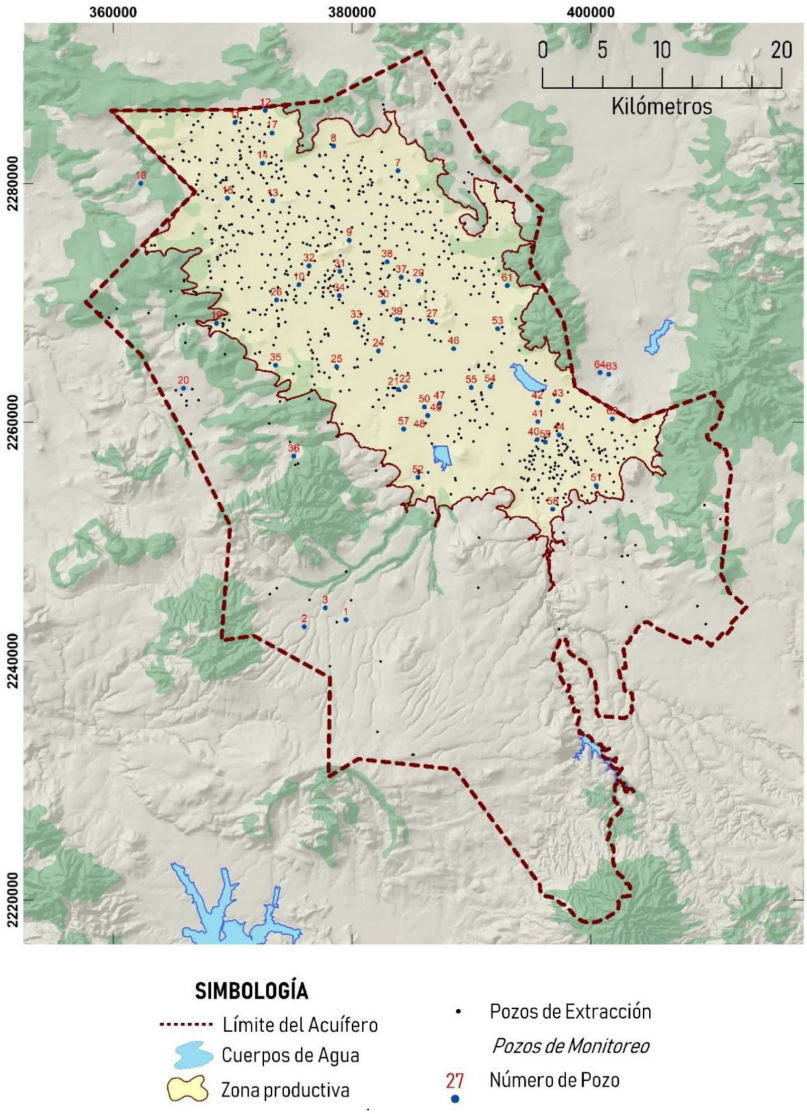
Se delimitó el valle del acuífero partiendo de la cota 2,000 msnm con una superficie total de 807.3 km^2. En la figura 3 se muestra el polígono del valle, en la que se encuentran la mayoría de los aprovechamientos subterráneos y pozos de observación con información en el acuífero, por esto es considerada como zona productiva del mismo.

3.5 Delimitación de la temporalidad

Las estimaciones previas de la recarga en el área de estudio han sido reportadas por la CONAGUA. En el año 2002 estimaron una recarga de 309 Mm^3, posteriormente, en 2015 publica una actualización de la estimación sin definir la temporalidad, con un volumen de 191.5 Mm^3. Además, Medina (2017) estimó la recarga a partir de la modelación numérica del acuífero en los períodos 2007-2011 y 2011-2014.

Para el período 2007-2011 se estimó una recarga de 216.4 Mm^3 y para el 2011-2014 un volumen de 221.2 Mm^3. Con base en lo anterior y, para efectos de la comparación entre estimaciones, se establecieron tres períodos de análisis (2012-2014, 2014-2017 y 2012-2017).

Figura 3. Área del valle del acuífero



Fuente: elaboración propia.

3.6 Descargas del acuífero

Los diferentes volúmenes de extracción de agua subterránea por bombeo proporcionados por el COTAS del acuífero del Valle de San Juan del Río y el re-

portado por Medina (2017), se muestran en el cuadro 1, asimismo se indica la temporalidad de este volumen aplicado a la ecuación de balance del acuífero.

Cuadro 1. Volumen de extracción para los diferentes períodos

Escala de intensidad	Simbología	Factor
Anormalmente seco	D0	0
Sequía moderada	D1	0.125

Fuente: elaboración propia.

- Estimación del cambio de almacenamiento (ΔS) y la recarga del acuífero

Con base en las técnicas especificadas para la obtención del cambio de almacenamiento, el coeficiente de almacenamiento (Sy) establecido por la CONAGUA para el acuífero del Valle de San Juan del Río es de 0.096. A continuación, se describen los resultados obtenidos para las temporalidades establecidas.

A) Promedio aritmético

- Estimación de la recarga para el período 2012-2014

La evolución del nivel piezométrico indica una disminución del nivel de agua subterránea en los pozos de monitoreo, obteniendo así un abatimiento de -87.39 m; mientras que el abatimiento promedio fue de -0.79 m. Este último, generó un volumen de roca drenada (Vrd) de -637.80 m^3. Para obtener el cambio de almacenamiento (ΔS) se aplicó un coeficiente de almacenamiento (Sy) de 0.096, dando como resultado -61.2 Mm^3. Finalmente, al aplicar la ecuación de balance y un volumen de extracción de 292 Mm^3, la estimación de recarga para este período fue de 231 Mm^3.

- Estimación de la recarga para el período 2014-2017

Para este período se observó un ascenso (elevación) en los niveles del agua subterránea de 73.41 m, por tanto, se determinó una elevación promedio (*Elevp*) de 0.44 m. Continuando, se obtuvo un volumen de roca saturada (*Vrs*) de 355. 2 Mm^3. Posteriormente se obtuvo un cambio de almacenamiento (ΔS) de 34.1 Mm3. Finalmente, aplicando la ecuación de balance y volumen de descarga de 306.9 Mm^3 se estimó una recarga de 340.7 Mm^3.

- Estimación de la recarga para el período 2012-2017

Durante este período se observó un abatimiento progresivo en la mayoría de los pozos de observación de -13.98 m y un abatimiento promedio de -0.05 m. El volumen de roca drenada (*Vrd*) fue de -40.3 Mm^3 y el cambio de almacenamiento (ΔS) de -3.8 Mm^3. Finalmente, aplicando la ecuación de balance y un volumen de descarga de 306.9 Mm^3 se estimó una recarga de 303 Mm^3.

B) Polígonos de evolución piezométrica

- Estimación de la recarga para el período 2012-2014

Se realiza el trazo de 13 polígonos de evolución del nivel piezométrico (figura 4) en los que se observan los mayores descensos (-3 m) en el centro del valle y el municipio de San Juan del Río, por su parte en la periferia del valle se muestran descensos de -1.0 y -0.5 m. Una vez conocidas las dimensiones de cada polígono (Cuadro 2), se obtiene un cambio de almacenamiento (ΔS) de -49.8 Mm^3 para el área del valle. Finalmente, aplicando la ecuación de balance y el volumen de descarga (establecido en esta temporalidad) estimando una recarga de 242.4 Mm^3.

- Estimación de la recarga para el período 2014-2017

Para este período se observaron elevaciones del nivel piezométrico (Figura 5) en la porción noroeste de los municipios El Marqués y Colon, con valores de 1.5 m, 2 m, 2.5 m y el mayor de 5 m. Además, la porción sureste del valle en los municipios de San Juan del Río y Pedro Escobedo, se observa una elevación del nivel de 1 m a 2 m. De acuerdo con las dimensiones de los 11 polígonos de evolución trazados para este período, se obtuvo un cambio de almacenamiento (ΔS) de 31.1 Mm^3 (Cuadro 3). Finalmente, aplicando la ecuación de balance y el volumen de descarga establecido para esta temporalidad se estimó una recarga de 338.1 Mm^3.

- Estimación de la recarga para el período 2012-2017

La evolución del nivel piezométrico indica un abatimiento en la mayoría de los polígonos trazados, sin embargo, en algunas zonas se observó una recuperación las cuales representan anomalías o errores en las mediciones de la profundidad del nivel (Figura 6), los mayores descensos se observan en la porción norte del valle de -5 m y -3 m; en la zona centro se observa un descenso de -0.5 m y -1 m, por su parte, el municipio de San Juan del Río reporta descensos de -1 y -0.5 m. Con base en los 20 polígonos de evolución trazados

en el área del valle (Cuadro 4), se obtuvo un cambio de almacenamiento (ΔS) de -10.3 Mm^3. Finalmente, aplicando la ecuación de balance y el volumen de descarga establecido para esta temporalidad se estimó una recarga de 296.6 Mm^3.

Cuadro 2. Cálculo del cambio de almacenamiento para el período, 2012-2014

	Variable		Variable
Bio 1.	Temperatura media anual	Bio 11.	Temperatura media del trimestre más frío
Bio 2.	Rango de temperaturas diurnas	Bio 12.	Precipitación anual
Bio 3.	Isotermalidad	Bio 13.	Precipitación del mes más lluvioso
Bio 4.	Estacionalidad en la temperatura	Bio 14.	Precipitación del mes más seco
Bio 5.	Temperatura máxima del mes más cálido	Bio 15.	Estacionalidad en la precipitación
Bio 6.	Temperatura mínima del mes más frío	Bio 16.	Precipitación del trimestre más lluvioso
Bio 7.	Rango anual de temperatura	Bio 17.	Precipitación del trimestre más seco
Bio 8.	Temperatura media del trimestre más lluvioso	Bio 18.	Precipitación del trimestre más cálido
Bio 9.	Temperatura media del trimestre más seco	Bio 19.	Precipitación del trimestre más frío
Bio 10.	Temperatura media del trimestre más cálido		

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 3. Cálculo del cambio de almacenamiento para el período, 2014-2017

No. Polígono	A (m^2)	Elevp (m)	Vrs (m^3) (A*Elevp)	Vrd anual (Vrs/3)	Cambio de almacenamiento (ΔS m^3) (Vrs anual*Sy)
0	3,325,833	3	9,977,499.0	3,325,833.0	319,279.96
1	2,789,381	3.5	9,762,833.5	3,254,277.83	312,410.67
2	5,230,045	2.3	12,290,605.8	4,096,868.58	393,299.38
3	87,454,575	2.5	218,636,438.0	72,878,812.5	6,996,366.0
4	115,285,759	1.5	172,928,639.0	57,642,879.5	5,533,716.43
5	5,953,018	6.4	38,099,315.2	12,699,771.7	1,219,178.09
6	20,388,496	4	81,553,984.0	27,184,661.3	2,609,727.49
7	2,989,022	3.2	9,564,870.4	3,188,290.13	306,075.85
8	34,366,327	3.5	120282145	40,094,048.2	3,849,028.62
9	25,630,783	1.5	38446174.5	12,815,391.5	1,230,277.58
10	503,942,902	0.5	262050309	87,350,103	8,385,609.89
			Σ		31,154,970
					31.1 Mm^3

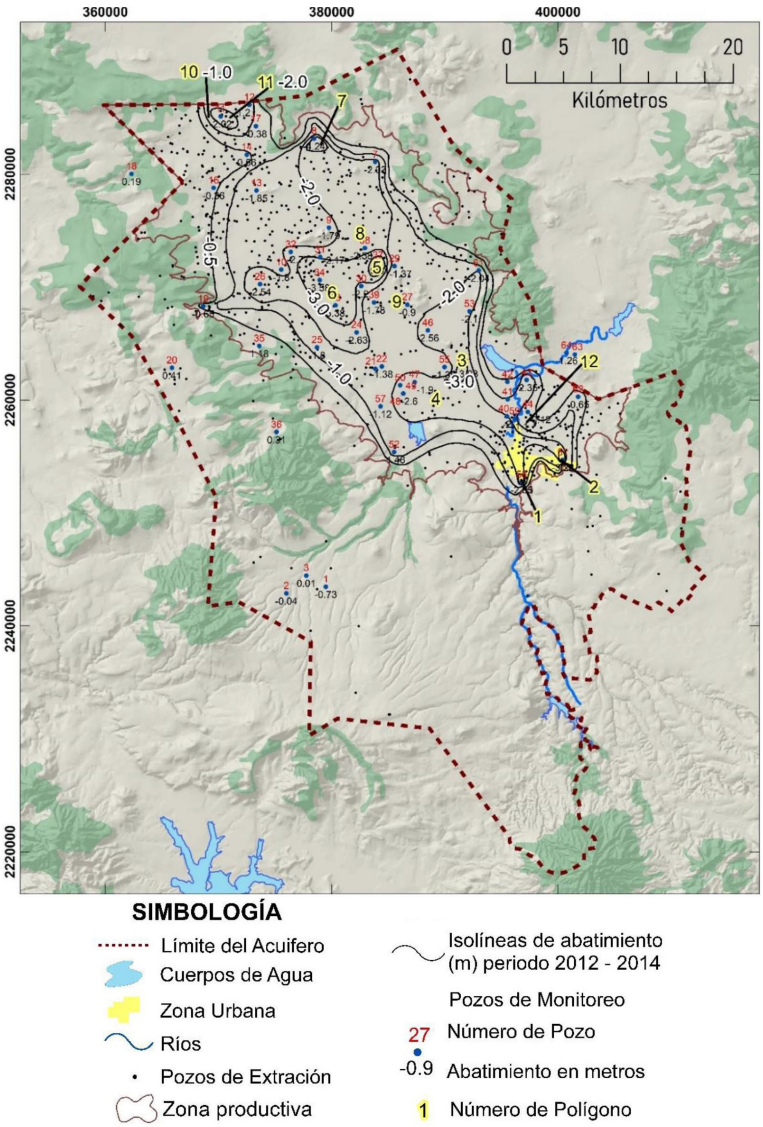
Fuente: elaboración propia.

Cuadro 4. Cálculo del cambio de almacenamiento para el período, 2012-2017

No. Polígono	A (m^2)	Abp (m)	Vrd (m^3) (A*Abp)	Vrd anual (Vrd/5)	Cambio de almacenamiento (ΔS m^3) (Vrd anual*Sy)
0	6788261	-1	-6,788,261.0	-1,357,652.2	-130,334.61
1	12212852	-0.7	-9,159,639.0	-1,831,927.8	-175,865.06
2	5138655	-2	-10,277,310.0	-2,055,462.0	-197,324.35
3	1966475	*0.9	*1,769,827.5	*353,965.5	*33,980.68
4	1747121	*6.7	*11,705,710.7	*2,341,142.14	*224,749.64
5	2537953	-3.1	-7,867,654.3	-1,573,530.86	-151,058.96
6	2042700	-6.7	-13,686,090.0	-2,737,218.0	-262,772.92
7	34197245	-1.5	-51,295,867.5	-10,259,173.5	-984,880.65
8	44621964	-1.5	-66,932,946.0	-13,386,589.2	-1,285,112.56
9	6411074	-4.4	-28,208,725.6	-5,641,745.12	-541.607.53
10	7458273	-3.7	-27,595,610.1	-5,519,122.02	-529,835.71
11	6598101	-2.5	-16,495,252.5	-3,299,050.5	-316.708.84
12	8453104	-1.5	-12,679,656.0	-2,535,931.2	-243,449.39
13	174602184	-0.7	-130,951,638.0	-26,190,327.6	-2,514,271.45
14	27264520	-2.5	-68,161,300.0	-13,632,260.0	-1,308,696.96
15	18558787	-1.5	-27,838,180.5	-5,567,636.1	-534,493.06
16	3897442	-3.3	-12,861,558.6	-2,572,311.72	-246,941.92
17	17202177	-0.7	-12,901,632.8	-2,580,326.55	-247,711.34
18	422516968	-0.1	-4,2251,696.8	-8,450,339.36	-811,232.57
19	3140285	-2.2	-6,908,627.0	*1,381,725.4	-132,645.63
			Σ		-10,356,213.26
					-10.3 Mm^3

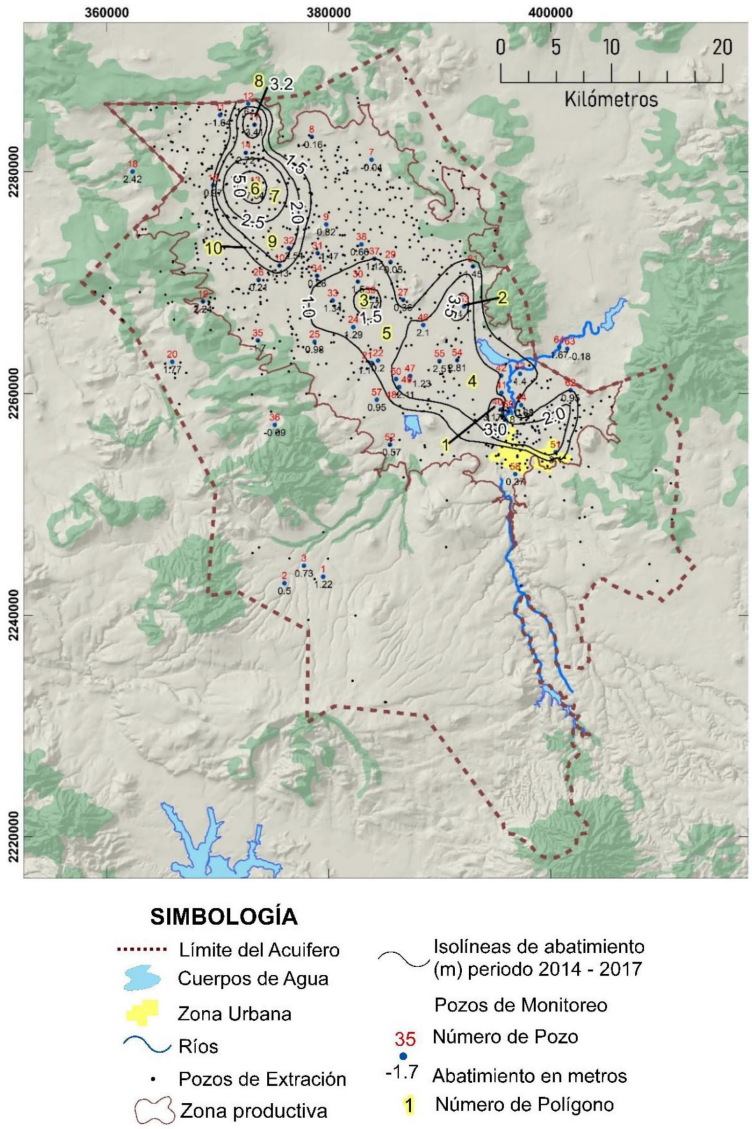
Fuente: elaboración propia.

Figura 4. Polígonos de evolución del nivel piezométrico en el período, 2012-2014



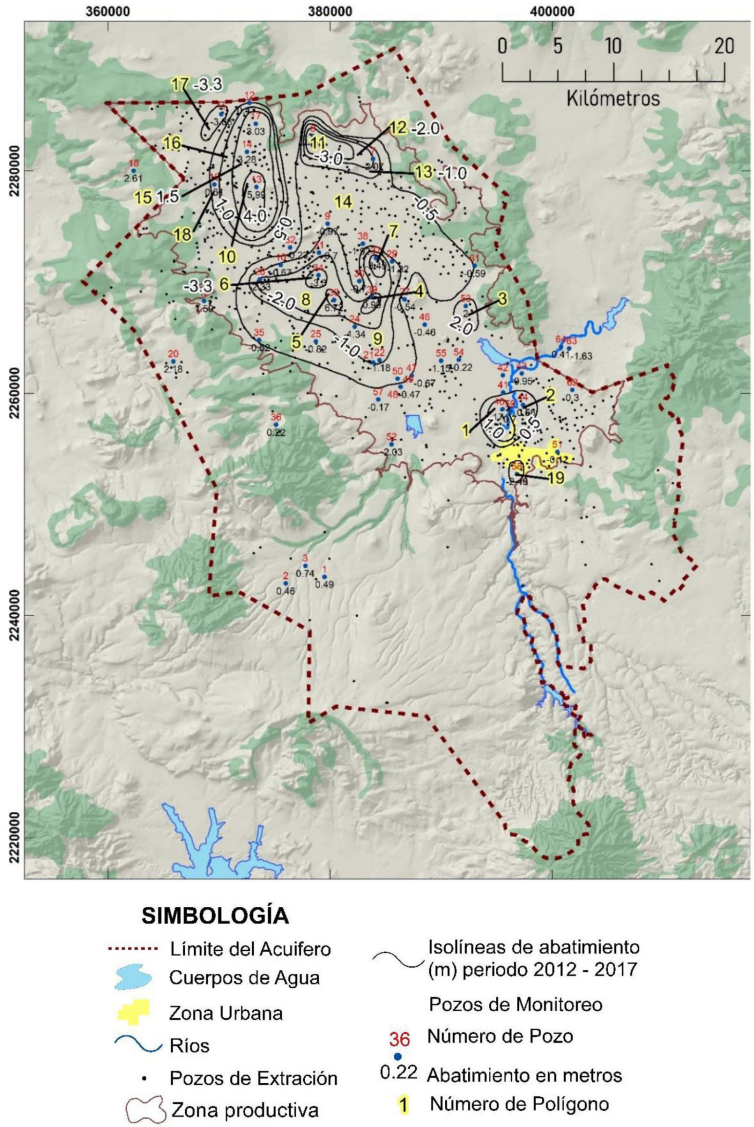
Fuente: elaboración propia.

Figura 5. Polígonos de evolución del nivel piezométrico en el período, 2014-2017



Fuente: elaboración propia.

Figura 6. Polígonos de evolución del nivel piezométrico en el período, 2012 -2017



Fuente: elaboración propia.

4. Discusión de los resultados

Mediante el análisis de la información recabada en el acuífero del Valle de San Juan del Río, se observa la recarga influenciada por las variaciones en la precipitación, siendo el componente de mayor incidencia en el volumen de agua que se infiltra en el acuífero: la cual presenta variaciones año con año sin seguir un patrón establecido (relación entre precipitación y recarga en el acuífero).

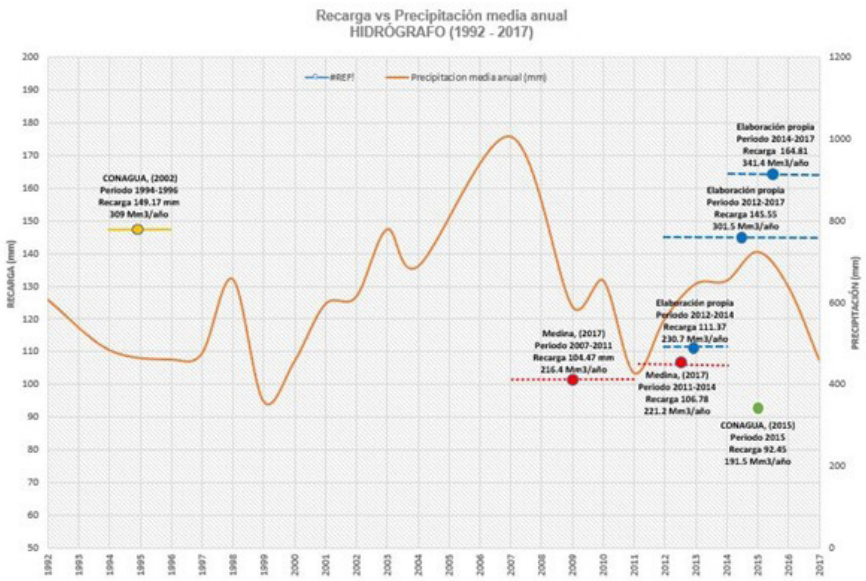
Las estimaciones del cambio de almacenamiento (ΔS) a partir de la técnica de promedio aritmético y polígonos de evolución piezométrica se aproximan, sin embargo, esto no significa que este método pueda utilizarse de manera simultánea, ya que requiere que los pozos de observación tengan una distribución uniforme en el área de balance; además de que los pozos cuentan con mediciones continuas y confiables. Por su parte, el coeficiente de almacenamiento es retomado de la CONAGUA (2002) con el objetivo de realizar la comparación de los volúmenes estimados en estudios previos.

En cuanto a los antecedentes de recarga para el acuífero CONAGUA (2002) estimó un volumen de 309 Mm^3 para el período 1994-1996, mientras para el año 2015 se dan a conocer una nueva estimación obteniendo un volumen de 191.5 Mm^3, en el que no se especifica su temporalidad. Medina (2017) realiza estimaciones de recarga para los períodos 2007-2011 y 2011-2014. En el primero obtuvo un volumen de 216.4 Mm^3 y el segundo 221.2 Mm^3 mismos que fueron validados por la modelación numérica.

Dicho lo anterior, en la figura 7 se muestra la relación entre precipitación y recarga a través del tiempo. En el gráfico se muestran períodos máximos y mínimos de precipitación que inciden en la disminución o aumento del volumen de agua que se infiltra y recarga al acuífero. Sin embargo, estas variaciones se ven reflejadas en años posteriores, debido a las características hidrogeológicas del acuífero. Asimismo, se muestran valores aproximados en los volúmenes de recarga obtenidas en esta investigación con respecto a las investigaciones previas. Tal es el caso de la estimación realizada por Medina (2017) en el período 2011-2014, una recarga de 221.2 Mm^3, mientras que para el período 2012-2014 (durante la presente investigación) fue de 230.7 Mm^3 mostrando una diferencia de 9.5 Mm^3.

Los valores numéricos pueden coincidir o aproximarse en los diferentes estudios realizados en el acuífero del Valle de San Juan del Río, pero es importante mencionar que no se puede esperar o buscar que los volúmenes coincidan pues no necesariamente deben ser iguales debido a que el principio físico de los métodos es diferente. Finalmente, se considera se obtuvieron resultados coherentes con lo establecido principalmente por la CONAGUA.

Figura 7. Relación entre la precipitación y el volumen de recarga estimados a lo largo del tiempo en el área de estudio



Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

Los resultados muestran la posibilidad de implementar el promedio aritmético y el trazado de polígonos de evolución del nivel piezométrico como técnicas para determinar el cambio de almacenamiento (ΔS) en el acuífero del Valle de San Juan del Río en la estimación de la recarga de acuerdo con lo establecido en la NOM-011-CONAGUA-2015.

También, se consiguió evidenciar que los resultados de la NOM-011-CONAGUA-2015, son cercanos a los estimados mediante el modelo conceptual realizado por Medina (2017). Para los fines prácticos de esta investigación, se descartó la estimación de otras variables de la recarga a un acuífero como la recarga vertical, las entradas por flujo subterráneo y la recarga inducida; las cuales están consideradas en la ecuación de balance de un acuífero, por lo que se recomienda que en futuros estudios sean consideradas estas variables ya que se cuenta con la información necesaria para obtenerlas.

Por otra parte, se recomienda conceptualizar los procesos de recarga en el acuífero para aplicar otros métodos de estimación que contemplen otras variables del ciclo hidrológico y permitan obtener la distribución espacial de la recarga que definen áreas prioritarias de máxima protección en planes de manejo orientados al manejo sustentable del acuífero.

Bibliografía

Antares, S.A. de C.V. (2008). Estudio técnico justificativo del acuífero Valle de San Juan del Río para su reglamentación. *Informe Técnico*.

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de San Juan del Río (2203), estado de Querétaro*. CONAGUA

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de San Juan del Río (2203), Estado de Querétaro.* CONAGUA

Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2021). *Acuíferos por Región Hidrológico-administrativa (2021).* Subdirección General Técnica.

CONABIO. (2010). *Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.* CONABIO. http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/

Custodio, E. (2002). Aquifer overexploitation: what does it mean? *Hydrogeology Journal,* 254-277.

Diario Oficial de la Federación (DOF). (2015). *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015, Conservación del recurso agua - Que establece las especificaciones y el métodos para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales.* Ciudad de México. DOF.

Healy, R. (2010). *Estimating Groundwater Recharge.* New York: Cambridge.

Medina Rivas, C. M. (2017). *Desarrollo de una metodología para la construcción de modelos conceptuales en acuíferos de alta complejidad hidrogeológica: Caso de estudio acuífero del Valle de San Juan del Río*. Tesis de Doctorado. Toluca de Lerdo: Universidad Autónoma del Estado de México.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Natuales (SEMARNAT) y Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2021). *Estadísticas del Agua en México 2021.* SEMARNAT y CONAGUA.

Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2010). *Caracterización Hidrogeológica de la porción no saturada del acuífero del Valle de San Juan del Río, estado de Querétaro. Querétaro*. SGM.

United Nation Educational, Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2022). *The United Nations World Water Development Report 2022 Groundwater Making the invisible visible.* UNESCO.

United Nations Educational, Scientific, Cultural Organization (UNESCO) y International Centre for Water Security and Sustainable Management (IWSSM). (2021). The Role of sound groundwater resources management and governance to achive water security. Pieona Books.

Vélez, E., García, S., Ruiz, V., y Sánchez, Á. (2020). Towards a Sustainable and

Adaptive Groundwater Management: Lessons from the Benalup Aquifer (Southern Spain). *Sustainability* (12).

Capítulo 18. Propuesta de un Sistema de Alerta Temprana contra Inundación (SATI) y Logística Humanitaria: Influencia de movimientos gravitacionales en la gestión del riesgo territorial en Colombia

David Alejandro Muñoz [1]
José Emilio Baró Suárez [2]

Introducción

El Cambio Climático (CC) y la Variabilidad Climática (VC) son fenómenos de preocupación mundial, especialmente por las implicaciones que tienen con la seguridad humana. Por un lado, el CC se entiende como la modificación del clima que se manifiesta en cambios de la media y/o variabilidad de sus propiedades a grande escala de tiempo y se expresa mediante la medición de factores climáticos tales como temperatura, precipitación, viento, entre otros. En cambio, la VC consiste en las variaciones del estado medio y otras estadísticas del clima en las escalas temporales y espaciales (IPCC, 2014). Dichos fenómenos generan profundos impactos en la sociedad humana, ecosistemas e infraestructuras y, por ello, se considera su estudio como una disciplina científica y tecnológica que debe ser desarrollada en todo el mundo (Campos Sánchez *et al*., 2013).

1 Magister en Ingeniería Ambiental. Facultad de Ciencias Naturales y Exactas, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

2 Doctor en Geografía. Facultad de Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.

En Colombia las investigaciones se han centrado en establecer escenarios donde se modelen los estados o comportamientos más probables de las regiones en el marco de la VC y el CC, así como sus principales impactos (IDEAM y UNAL, 2018). Existen estudios que evalúan la vulnerabilidad de regiones y ecosistemas del país (Vargas-Franco y Restrepo-Tarquino, 2018). Ante este escenario, el departamento del Cauca expone condiciones que son objeto de preocupación, por ser uno de los territorios estratégicos para el pulso hídrico del país (Gómez & Hidalgo, 2020); de igual manera en la zona norte del departamento existe un impacto potencial "debido a que los ecosistemas están fuertemente transformados y no hay posibilidad de beneficio de los servicios ecosistémicos de regulación climática e hídrica" (CRC, 2018).

> *Las consecuencias de la variabilidad climática en el Departamento del Cauca se perciben a través de los cambios en la temperatura, del incremento en la magnitud y frecuencia de eventos como sequías, vendavales, lluvias torrenciales, granizadas, entre otros (Alcaldía de Popayán. Oficina Asesora Gestión del Riesgo, 2019) y el aumento de situaciones adversas de escasez de agua e inundaciones, incendios forestales, erosión y heladas (Ortiz, 2012). Durante el fenómeno La Niña del 2010, aproximadamente 49.000 predios agrícolas resultaron afectados por el exceso de lluvias, presentando un declive en la productividad, y bajo las condiciones de la fase El Niño del 2015, se presentaron descensos en la producción de alimentos, así como en la calidad de los mismos, especialmente en cultivos como maíz, fríjol y hortalizas (Alcaldía de Popayán. Oficina Asesora Gestión del Riesgo, 2019; Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).*

Ante este contexto, en el marco de la gestión del riesgo se establece de acuerdo con Baró *et al*. (2011), que un SATI o Sistema de alerta temprana contra inundaciones, consiste en la integración de los siguientes elementos o variables a considerar.

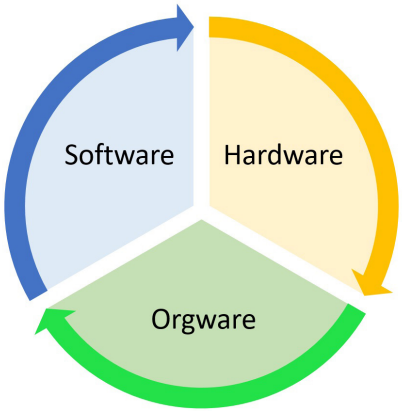
En el contexto del SATI existen tres componentes principales que se entrelazan directamente para brindar a las comunidades una caja de herramientas que garantice el autocuidado y proteja los elementos corporales, estructurales y funcionales. Estos componentes generan una dinámica que permite a las comunidades desarrollar capacidades de respuesta y, en consecuencia, fortalecer su resiliencia frente a los riesgos socionaturales.

Figura 1. Elementos y dimensiones del sistema de alerta temprana contra inundaciones



Fuente: Baró *et al.*, 2011.

Figura 2. Componentes del SATI desde la logística humanitaria



Fuente: Baró *et al.*, 2011.

El Sistema de Alerta Temprana Integrado (SATI) consta de 4 elementos clave: a) Identificación de riesgos, b) Monitoreo y servicios de alerta, c) Diseminación, articulación y comunicación, d) Capacidad de respuesta. El propósito del SATI se basa en la prevención de los riesgos de inundación, orientando y fomentando la autoprotección de la vida y bienes de las personas. El

sistema SATI está compuesto por los siguientes elementos: 1. Hardware: que engloba la infraestructura física necesaria para el monitoreo, alertas y difusión de situaciones de alto riesgo. 2. Software: que comprende los conocimientos, métodos y técnicas utilizados en la toma de decisiones. 3. Los procedimientos que para el sistema se denominan Orgware (Logística humanitaria y cadena de suministro): establece un conjunto de reglas, secuencias de acciones y asignación de responsabilidades como protocolo para desarrollar una capacidad de respuesta ante inundaciones y aumentar la resiliencia (Díaz-Delgado, s.f.).

> *Como respuesta a estos inminentes desastres desencadenados a partir de fenómenos naturales complejos, los Sistemas de Alerta Temprana Contra Inundaciones (SATI), se proponen como una estrategia eficaz, la cual puede ser adoptada en sociedades con población expuesta al riesgo de desastres para lograr reducir al máximo los impactos que puedan generar estos fenómenos. En el presente documento de revisión, se propone la implementación del SATI, que permita adquirir herramientas enfocadas a conseguir la reducción de pérdidas económicas y de vidas humanas a raíz del potencial desencadenamiento de inundaciones, movimientos en masa o deslizamientos. Estos fenómenos naturales se han presentado a lo largo de la historia geológica como parte fundamental de la constante evolución del relieve y el paisaje. Este sistema basa su efectividad en el entendido que debe proveer información efectiva y a tiempo, hacia las entidades y el público correspondiente, permitiendo a la población expuesta tomar medidas para evitar o reducir su nivel de riesgo y prepararse para una respuesta efectiva (Brazzola et al., 2021).*

1. Generalidades

En Latinoamérica, para el caso de Colombia, los eventos de riesgos que han ocurrido están relacionados con los eventos socionaturales. Algunos de los registros se realizaron teniendo en cuenta el cálculo de daños, pérdidas y costos. Se llevó a cabo en el informe Evaluación de Riesgos Naturales -Colombia- ERN. El estudio se articuló con la estimación de la vulnerabilidad para generar un programa de reducción de la misma y logrando en este sentido un apoyo del gobierno japonés y el Banco Mundial (Cardona Arboleda *et al*., 2004). Estos desastres han desencadenado enormes pérdidas económicas y vidas humanas como ha quedado evidenciado en los reportes históricos. Desastres que han quedado en la memoria de los colombianos como lo son el terremoto en Popayán (1983), con un saldo de 287 muertes, la erupción del cráter Arenas del volcán Nevado del Ruiz en 1985, que dejó cerca de 23.500 muertes; la creciente del río Combeima Ibagué en 1987; dejando cerca de 170 familias afectadas y daños en la infraestructura pública, entre muchos otros (Cardona Arboleda *et al*., 2004). En el cuadro 1, se presenta una breve descripción de los desastres asociados a movimientos en masa más significativos que han afectado el territorio nacional.

Cuadro 1. Datos sobre afectaciones por movimientos en masa por regiones de Colombia

REGIÓN	NÚMERO DE REGISTROS	MUERTES	AFECTADOS	VIVIENDAS AFECTADAS	VIVIENDAS DESTRUIDAS
Amazónica	181	94	18587	243	149
Andina	7182	5927	1405030	47384	13857
Caribe	296	116	36338	3206	2337
Orinoquia	255	68	49579	533	147
Pacifico	2524	1126	1221102	50583	7581
TOTAL	**10.438**	**7.331**	**2.730.636**	**101.949**	**24.071**

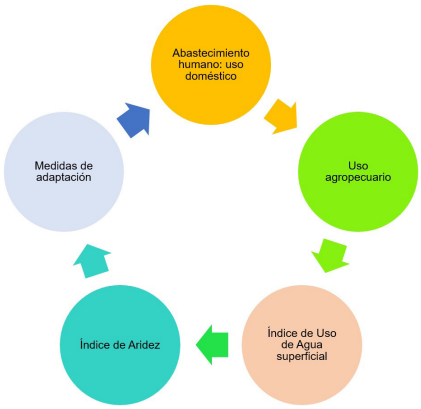
Fuente: Desinventar.org, 2020.

El Departamento del Cauca se encuentra entre las regiones Pacifico y Andina, por ello, la revisión de los movimientos en masa para Colombia permite evidenciar el impacto de éstos. Los factores naturales que influyen en estos acontecimientos tienen relación con la cantidad de agua presente, es decir las lluvias, entre otras variables y análisis se puede determinar que durante meses se presenta un incremento de esos eventos naturales.

2. Cauca despensa hídrica

La presencia del Macizo Colombiano en el departamento del Cauca expone lo imperativo de la gestión integrada del recurso hídrico que esta zona del país representa para Colombia. El abastecimiento de agua para consumo humano proviene de las cuencas de los ríos que nacen en esta área de importancia ambiental y que surte a gran parte del departamento. Ante este escenario, se hace necesario establecer los lineamientos que permitan garantizar la sostenibilidad de los servicios ecosistémicos que garanticen el recurso hídrico disponible, ya que de ello dependen los cambios territoriales. Un estudio realizado en el 2016, evidencia como la región Caucana presenta niveles altos de amenaza y vulnerabilidad para la disponibilidad del agua en los escenarios futuros, por lo tanto, es necesario un manejo integrado que garantice y permita la creación de medidas de adaptación estructurales y no estructurales para la gestión integrada del riesgo (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2016).

Figura 3. Usos del agua desde sus servicios ecosistémicos



Fuente: elaboración propia.

Se debe garantizar entonces, la posibilidad de interpretar la información climática para generar herramientas que permitan definir zonas homogéneas del territorio, en términos de clima, fisiografía, suelos y usos del suelo (zonas agroclimáticas) evaluar los impactos de la variabilidad climática (Bautista Zúñiga *et al.*, 2016). Adicionalmente, la planificación del territorio, la formulación de planes de adaptación y la toma de decisiones, requiere de la identificación y evaluación de la variación meteorológica causada por los ciclos ENOS en las zonas agroclimáticas para la conservación de los ecosistemas y el desarrollo productivo de los territorios (CIIFEN, 2012). Esto a su vez, desde un enfoque de ejes temáticos que permitan garantizar la articulación de acciones trasversales como se muestra en la figura 4.

Figura 4. Ejes estratégicos y transversales para el SATI



Fuente: elaboración propia.

En el siglo XXI, la vulnerabilidad del recurso hídrico, se ha convertido en una fuente de conflictos. Las fallas para implementar una adecuada gestión de los recursos hídricos, la contaminación y el rápido crecimiento demográfico, genera escasez de agua y amenazan la seguridad alimentaria. Como resultado, los expertos advierten sobre la necesidad de incrementar la disponibilidad de este recurso, ya que se proyecta en la población mundial con un alcance de 8.900 millones de personas para el 2050 (Niang *et al.*, 2003; Niasse, 2005; OECD, 1994; UNEP, 2002).

3. Evaluación del riesgo de inundación

La evaluación del riesgo para cualquier tipo de evento, consiste en definir un mínimo técnico. En el caso de las inundaciones, es necesario el estudio de los riesgos socionaturales los cuales son predecibles desde la evaluación científica y, aquellos que se pueden convertir en sucesos peligrosos, es decir una catástrofe. Los elementos de dicha evaluación se enmarcan a continuación (Figura 5):

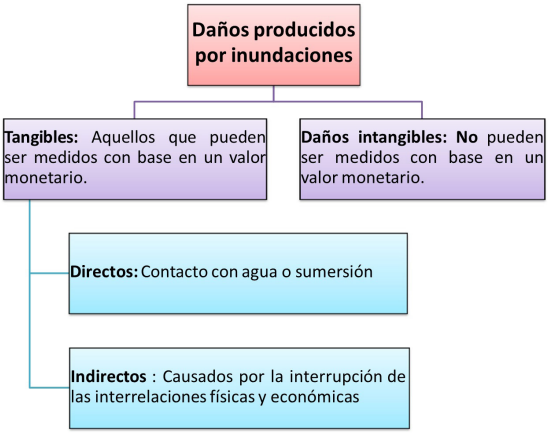
Figura 5: Elementos estudiados en la evaluación del riesgo por inundación.



Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, es necesario establecer la relación que existe entre los elementos de la evaluación del riesgo y los daños producidos por la inundación. Como se ilustra en la figura 6, dicha relación es prevalente e imperativa debido a que se logra establecer un análisis de los factores de riesgo y sus procesos. Asimismo, la adaptación del sistema expuesto mediante los umbrales obtenidos, por la duración de la inundación y la altura en la lámina del agua.

Figura 6. Estimación de costos por inundación.



Fuente: Díaz-Delgado, s.f.

4. Logística humanitaria y cadena de suministro en los sistemas de alerta temprana contra inundaciones

De acuerdo con Díaz-Delgado (s/f.) dentro de los vínculos de riesgos por inundaciones y el medio físico, se establecen cuatro fases o procesos dentro de los cuales, al ser tenidos en cuenta, se pueden reducir los riesgos. Dicho de otro modo, debe existir una serie de actividades estratégicas que sirvan de planeación para su posterior implementación que logre un enfoque reactivo y preventivo. Por lo tanto, la información de la cual se disponga estará relacionada desde un eje transversal que tenga como objetivo la mitigación del impacto al cual estarían expuestas las personas más vulnerables.

A continuación, se ilustra en la figura 7, los esbozos metodológicos de la mitigación, recuperación, respuesta y preparación dentro del ciclo del desastre por inundación. Es clave entonces, ajustar de acuerdo con los postulados descritos en este documento la necesidad de integración de las dimensiones del cambio climático, la gestión integral del recurso hídrico en conjunto con la gestión del riesgo, para lograr un enfoque climático para el territorio objeto de estudio como lo es la reserva natural Munchique, cuenca del río Quilichao (Figura 8).

Figura 7. Logística humanitaria en el SATI



Fuente: adaptado de Díaz-Delgado, s.f.

Figura 8. Componentes articuladores al SATI



Fuente: elaboración propia.

5. Medidas y ejes para el manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Quilichao

La presencia en las zonas de reserva natural (ZRN) Cerro Munchique los Tigres, los resguardos indígenas de Canoas, Concepción, Guadualito, Munchique-Los Tigres y Huellas, establece un vínculo fuerte con el enfoque socioecosistémico, así como la visión holística del manejo de los recursos naturales presentes en el territorio, donde se reconocen los atributos del sistema am-

biental disponible como beneficio a las familias y exponer de igual manera los conflictos socioambientales debido a la realidad de las comunidades indígenas en el territorio Caucano por la lucha equitativa y la forma de entender y valorar los recursos naturales. Por consiguiente, resulta fundamental contar con un marco teórico y conceptual que nos permita emplear la información disponible para examinar las interacciones entre la sociedad y la naturaleza. De lo contrario, nos será imposible hacer frente al cambio global en el que nos hallamos inmersos (Anderies *et al*., 2004; Berkes y Seixas, 2005; Folke *et al*., 2005; Liu *et al*., 2007; Tobón, 2009).

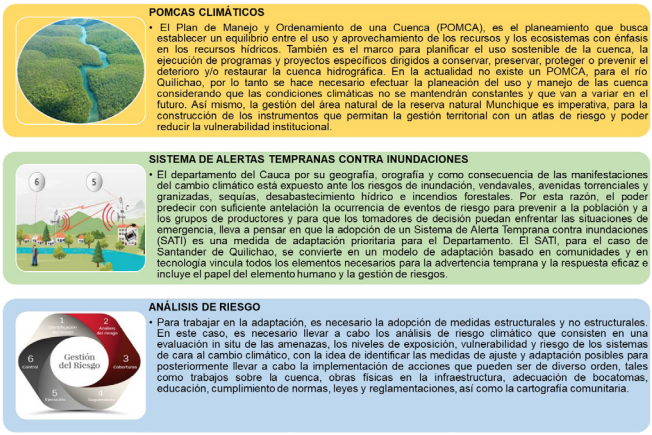
Ante este contexto, la Reserva Natural Cerro Munchique-Los Tigres, ubicada en el Municipio de Santander de Quilichao, se convierte en centro de atención debido a su importancia ambiental y características especiales de lugar (último relicto de bosque del Norte del Departamento del Cauca) y su potencial hídrico como principal ecosistema de la microcuenca río Quilichao; adicional a ello, en consultas realizadas a Parques Nacionales Naturales de Colombia (PNN), esta zona no se encuentra catalogada en el Registro Único Nacional de áreas protegidas (RUNAP), lo que evidencia una necesidad urgente de estudio para establecer la vulnerabilidad del recurso hídrico y su relación debido a los efectos que trae consigo el cambio climático.

A continuación, se representan de acuerdo con los contextos expuestos, las medidas para potenciar oportunidades que permitan reducir la vulnerabilidad climática del recurso hídrico e incrementar sus conexiones mediante una gestión efectiva para afrontar el cambio climático. Dicha gestión es posible mediante un enfoque de cuencas, en el cual se destaque el sistema socioecológico por medio del cual se puedan identificar y estudiar "los procesos de acoplamiento e interacción entre los sistemas sociales (cultura, economía, organización social y política) y los sistemas ecológicos (naturaleza) en un espacio-tiempo determinado" (Nur *et al*., 2012). De esta forma, se busca un equilibrio integral, enfocado en preservar los recursos naturales, fomentar el crecimiento económico local y garantizar la equidad social en las comunidades que rodean el área de influencia (Perfecto *et al*., 2019; Serrano Caldera, 2005).

Los ejes propuestos para el manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Quilichao, están enmarcados para establecer los lineamientos en la adaptación al cambio climático; desde un enfoque de cuencas donde se integren a escala del territorio proceso como respuesta hidrológica de la cuenca desde sus características fisiográficas. La planificación entonces desde un Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA) climático, SATI y análisis de riesgo que garantice una mitigación por daños, obras de regulación y medidas de adaptación. En el corto plazo para el año 2040, se espera que el departamento del Cauca, Colombia deba tener un plan estratégico para las necesidades básicas de la población caucana como lo es la calidad del

recurso hídrico, lo cual impacta directamente en la salud y calidad de vida, así mismo, el uso con fines agrícolas y pecuarios del recurso hídrico para la productividad de los sectores (Figura 9).

Figura 9. Ejes para el manejo del recurso hídrico en la cuenca del río Quilichao



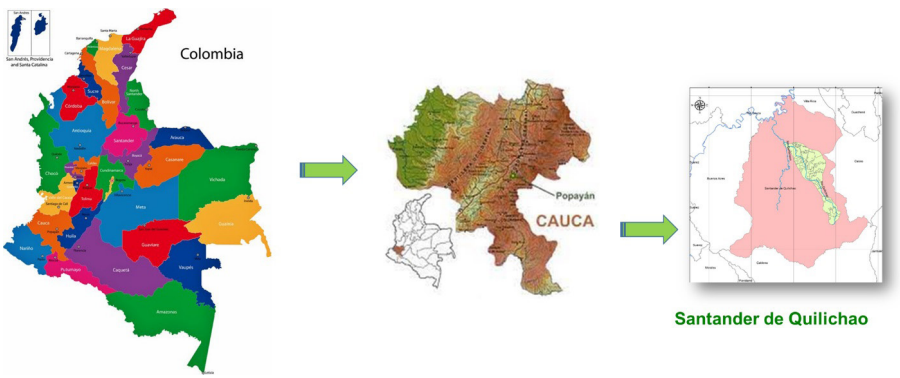
Fuente: elaboración propia.

En este contexto, se comprende que la variabilidad climática y el cambio climático suponen un reto en el manejo de los recursos hídricos, por tanto, las cuencas hidrográficas se constituyen como ecosistemas claves para la subsistencia humana, pues éstas se comprenden como unidades naturales para la planeación (Vargas Franco y Restrepo Tarquino, 2018). Entre los servicios ambientales que brindan las cuencas hidrográficas, se destaca el suministro de agua potable, por lo que las zonas de reserva natural se convierten entonces en base fundamental del sistema socioecológico de la cuenca y relevantes para el desarrollo de modelos para la gestión integrada, dados los servicios ecosistémicos que prestan. Disponer de información integrada de estas zonas, es muy valioso para la toma de decisiones estratégicas pues se establece la capacidad de respuesta de los recursos naturales para adaptarse el cambio climático (Balvanera y Cotler, 2007; McCarthy *et al*., 2001).

Las zonas de reserva natural (ZRN) y áreas protegidas (AP) se convierten en territorios de importancia ambiental: la flora, fauna, suelo y agua se encuentran disponible gracias a sus servicios ecosistémicos. Estas características se convierten en mecanismos para enfrentar los eventos derivados por el cambio climático, por ello, son necesarias las medidas no estructurales desde el punto de vista de la adaptación. Es decir, acciones institucionales, planeación, organización, coordinación y ejecución de planes, procesos para disminuir

los daños causados y lograr la conservación como el cuidado de las cuencas mediante la elaboración de mapas de riesgos y reordenamiento territorial, con la vigilancia y alerta de planes enfocados en la protección civil y la difusión de dicha información (Figura 10).

Figura 10. Ubicación a escala del municipio de Santander de Quilichao



Fuente: elaboración propia.

Algunos autores han referido que los servicios ecosistémicos (bienes y servicios ambientales) dependen en gran medida de las ZRN y las AP, por lo tanto, el uso de los mismos será un factor clave por parte de los actores sociales y comunidades para enfrentar los escenarios que traiga consigo el cambio climático (Figueroa *et al*., 2011; Saadatseresht *et al*., 2009).

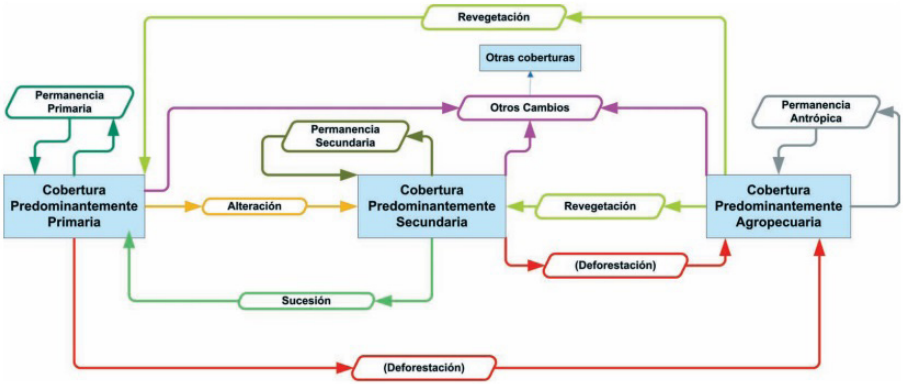
Es por ello por lo que ante los posibles efectos que traerá el cambio climático, derivado de los cambios del clima y eventos de orden antrópico, se establece una serie de estrategias que permiten fortalecer la visión integral del papel que las comunidades representan en los territorios y su función principal en el manejo de este. Por lo cual, en el año 2013, el Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS) establece las bases conceptuales y guía metodológica para iniciativas rápidas para la adaptación basada en comunidades (ABc) para Colombia. Dicha necesidad es imperante y reviste importancia debido a que el informe del panel Intergubernamental de Cambio climático (IPCC, 2014) se pronostica aumentos en la temperatura entre (1.5 y 4.5 °C) para el año 2100, ha conllevado a la creación significativa de estrategias, mecanismos y políticas, así como la generación de nuevo conocimiento con relación a la adaptación al cambio climático.

En este sentido el IPPC y el Departamento Nacional de Planeación (DNP, 2002) llegaron a la conclusión del papel fundamental que representan las co-

munidades en los procesos de adaptación, los cuales deben ser locales (metodología ABc) se convierte en una estrategia de alta importancia para el trabajo con los grupos más vulnerables, rurales y urbanos. De igual manera, lograría un alto potencial de sostenibilidad y apropiación local. Finalmente, la ABc también permitirá, desde la percepción social del riesgo, establecer los costes de vidas humanas salvadas y medidas de adaptación racionales con las necesidades de cada comunidad. (Adger *et al*., 2007; DNP, 2002; Heltberg *et al*., 2009; IDEAM, 2010).

Por lo tanto, en el territorio de la RNM Munchique los Tigres se podrán evidenciar cuáles son los posibles cambios a los que se vería enfrentado el uso de suelo dentro del territorio de la cuenca río Quilichao, cerro Munchique-Los Tigres. Estos procesos se representan a continuación (Figura 11).

Figura 11. Cambio de cobertura y uso de suelo

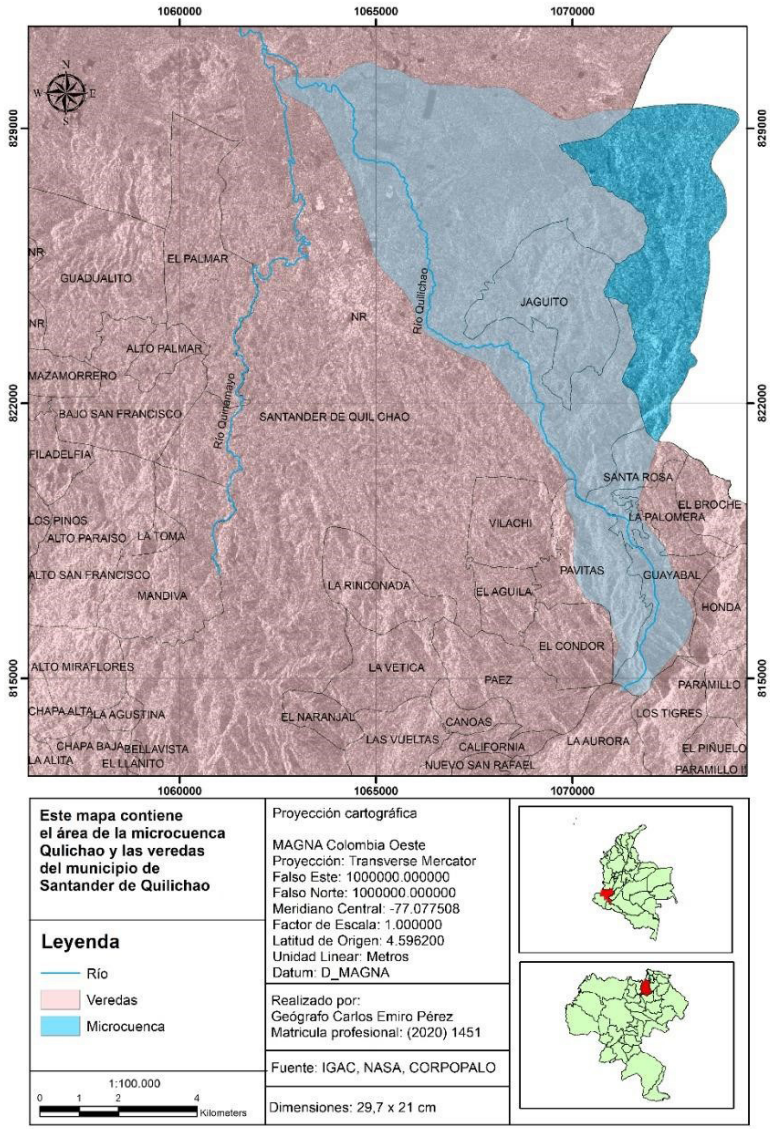


Fuente: elaboración propia.

Por medio de una radiografía, es necesario establecer los elementos y componentes socioecológicos asociados a la cuenca río Quilichao, estableciendo las principales funciones hidrológica, ecológica, ambiental y socioeconómica; las cuales se articulan en tres momentos fundamentales: caracterización biofísica, evaluación participativa y síntesis ambiental. Dado que algunas de estas condiciones modifican el sistema natural y, con ello, todo el equilibrio dinámico del recurso hídrico, se vuelve necesario el desarrollo de técnicas e instrumentos para la toma de decisiones debido a que los ecosistemas presentes en el territorio de cuencas hidrográficas, recibiendo la presión de los factores subyacentes del riesgo, derivados de los procesos antrópicos que al combinarse con los eventos de origen natural, generan pérdida de la capaci-

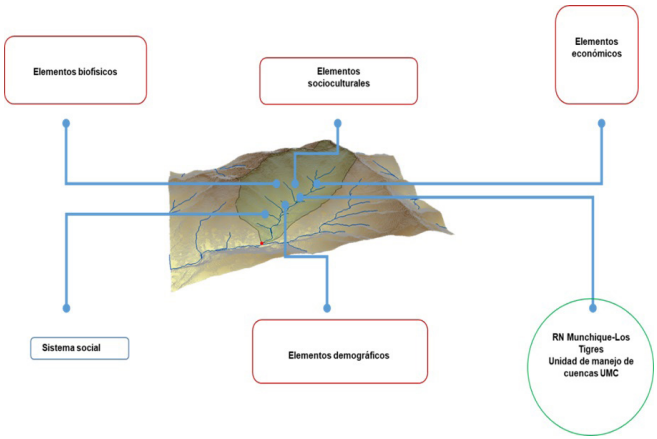
dad de respuesta y de adaptación, que a largo plazo inciden en la resiliencia (Balvanera y Cotler, 2007; Walker, 1992) (Figura 12 y 13).

Figura 12. Área cuenca río Quilichao y las veredas del municipio



Fuente: elaboración propia.

Figura 13. Componentes del sistema ambiental de la cuenca río Quilichao en la reserva natural Munchique-Los Tigres



Fuente: elaboración propia.

De esta manera, el SATI permitirá realizar un diagnóstico del recurso hídrico y se convertirá en una herramienta metodológica como respuesta a los eventos de riesgo que se derivan por la alta exposición y vulnerabilidad a la cual se encuentra el territorio de la cuenca del río Quilichao (Figura 14).

Figura 14. Diagnóstico de la cuenca río Quilichao en la reserva natural Munchique-Los Tigres para el SAT

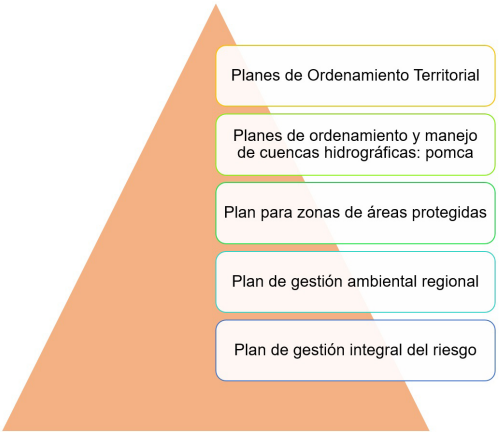


Fuente: elaboración propia.

Finalmente, es imperativo para el municipio de Santander de Quilichao, desarrolle una línea base de información que se convierta en conocimiento

ciudadano. Dentro de lo cual se puede contemplar la actualización y creación de planes que se convierten en programas y proyectos que definen las acciones que deberán estar encaminadas a la gestión estratégica del municipio (Figura 15).

Figura 15. Planes para la gestión estratégica municipal



Fuente: elaboración propia.

La inclusión del manejo del agua en los procesos de planeación para la gestión integrada del recurso hídrico (GIRH), supone una metodología propia derivada de las condiciones de cada territorio que incluye compromisos institucionales para el manejo y cuidado de los servicios ecosistémicos, ya que la reducción de la vulnerabilidad y resiliencia del territorio depende del conjunto de acciones para construir una visión futura de la cuenca; por lo tanto, el departamento del Cauca tendrá que formar una unidad interdisciplinaria para definir los aspectos fundamentales: sociales, económicos y ambientales.

Por otro lado, al incluir el cambio climático en los procesos de adaptación, se deben identificar y priorizar planes que darán lineamientos para establecer las acciones eficientes en la recuperación y manejo sustentable de los recursos hídricos, así como la riqueza y abundancia de los bienes y servicios ambientales. Adicionalmente, la historicidad de eventos como inundaciones, deslizamientos, pérdidas de productividad, pérdida de la biodiversidad, afectación de la regulación climática e hídrica, vectores de enfermedades, entre otros, son factores a estudiar, para determinar así a los responsables directos, involucrados, tiempo y recursos.

La formulación de las estrategias: implica un proceso participativo social con visión a largo plazo desde la visión territorial, con posiciones futuras,

resultados tangibles, áreas estratégicas de planeación y articulación. Este proceso estará enmarcado en las siguientes medidas (Figura 16):

Figura 16. Formulación de estrategias para proceso participativo social



Fuente: elaboración propia.

Líneas de acción: Incorporan y consideran áreas estratégicas y sus dimensiones, para poder lograr un nivel de comunicación coordinado por las instituciones del orden nacional y aterrizar las rutas de trabajo a escala regional. En este caso, es necesario construir de manera colectiva las capacidades para lograr objetivos comunes dentro de los escenarios de conservación de los recursos naturales y de los planes de ordenamiento ecológico y territorial.

Propuesta de articulación y operación: Definir una planeación táctica a corto plazo entre instituciones de entidades tales como: Alcaldía Municipal, Secretarías adscritas, sector productivo público y privado, las Instituciones de Educación Superior, las Instituciones Educativas, autoridad ambiental regional CRC, centros de investigación, entre otros.

Capacitación: Coordinar la creación de programas de educación ambiental enmarcados en procesos de sensibilización a los diversos grupos focalizados y facilitadores para retroalimentar y realizar una participación organizada mediante plataformas y mesas de trabajo, así como la realización de convenios de cooperación que integran profesionales y expertos con miras a generar un liderazgo en los programas de planificación y ordenamiento.

Sistema de información: La información y generación de conocimiento será una ruta clave en el departamento del Cauca para lograr la consolidación de programas que permitan planear en conjunto con los sectores relacionados, un enfoque sistémico que estructure y ponga a disposición de la sociedad un sistema de información ecológico y climático que permita la toma de decisiones para lograr territorios resilientes.

Determinantes ambientales: Es necesario una intervención normativa que permita una gestión sostenible del territorio desde el marco ambiental actual, para definir mecanismos de participación social y sectorial que contemple la actualización de los procesos de planificación del territorio, en especial con la Ley de uso de suelo, y que logre a nivel local, la formulación de los POT e incorporar el ordenamiento ecológico territorial.

Conclusiones

La propuesta de un SATI se establece en el marco de una formulación de estrategias que permitan coordinar aspectos ecológicos, económicos y sociales en la gestión integrada del riesgo. Por lo tanto, los cambios venideros en los escenarios futuros deberán contar con la aplicación de instrumentos y mecanismos de gestión, que apoyen una visión conjunta y de participación entre instituciones del orden nacional, regional y local.

Asimismo, desde un marco legal y normativo en Colombia, la Ley 388 de 1997 requiere una base legislativa sobre la cual se sustenta y soporta el manejo, planificación y uso del territorio en términos del suelo, en el cual hay sinergias y relaciones entre los diversos sistemas sociales y naturales.

Finalmente, un proceso de evaluación para definir y concertar la evolución y el impacto de la planeación territorial; los ajustes que se requieran para mejorar los resultados y poder de esta manera tener un mecanismo que permita el análisis de los indicadores como su impacto en los procesos de aprendizaje, siendo experiencias significativas para la construcción de la credibilidad y confianza en la institución.

Bibliografía

Adger, W. N., Agrawala, S., Mirza, M. M. Q., Conde, C., O´brien, K., Pulhin, J., Pulwarty, R., Smit, B., y Takahashi, K. (2007). Assessment of adaptation practices, options, constraints and capacity. *En Climate Change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 717-743). Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar4_wg2_full_report.pdf

Alcaldía de Popayán. Oficina Asesora Gestión del Riesgo. (2019). *Estrategia departamental para la respuesta a emergencias en el Departamento del Cauca* (Vol. 53). Oficina Asesora para la gestión de riesgo de desastre del Cauca.

Anderies, J. M., Janssen, M. A., y Ostrom, E. (2004). A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. *Ecology and Society, 9*(1), 18. https://tinyurl.com/7wj9vea

Balvanera, P., y Cotler, H. (2007). Acercamientos al estudio de los servicios ecosistémicos. *Gaceta ecológica*, 84-85, 8-15. https://www.redalyc.org/pdf/539/53908502.pdf

Baró Suarez, J. E., Díaz Delgado, C., Calderón Aragón, G., Esteller Alberich, M. V., y Cadena Vargas, E. (2011). Costo más probable de daños por inundación en zonas habitacionales de México. *Tecnología y Ciencias del Agua, 2*(3), 201-218. https://tinyurl.com/2xou5rc8

Bautista Zúñiga, F., Bautista, D., Delgado Carranza, M. del C., Páez, R., Mendoza Cantú, M. E., y Álvarez Verdugo, G. (2016). Estudio de caso: Zonificación agroclimática en la región de infiernillo. En *La biodiversidad en Michoacán. Estudio de Estado* (Vol. 2, pp. 47-50). CONABIO.

Berkes, F., y Seixas, C. S. (2005). Building Resilience in Lagoon Social–Ecological Systems: A Local-level Perspective. *Ecosystems, 8*(8), 967-974. https://doi.org/10.1007/s10021-005-0140-4

Brazzola, N., Wohland, J., y Patt, A. (2021). Offsetting unabated agricultural emissions with CO2 removal to achieve ambitious climate targets. *PLOS ONE, 16*(3), e0247887. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0247887

Campos Sánchez, M., Herrador, D., Manuel, C., y McCall, M. K. (2013). Estrategias de adaptación al cambio climático en dos comunidades rurales de México y el Salvador. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 61, 329-349. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4157745

Cardona Arboleda, O. D., Wilches-Chaux, G., García, X., Mansilla M., E., Ramírez Gómez, F., y Marulanda, M. C. (2004). *Estudio sobre desastres ocurridos en Colombia: Estimación de pérdidas y cuantificación de costos.* Evaluación de Riesgos Naturales, Colombia. https://tinyurl.com/22cwh6qb

CIIFEN. (2012). *Implementación de un sistema de información de vulnerabilidad sectorial de la provincia del Guayas frente al cambio y la variabilidad climática: Manual para difusión pública*. Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño. https://tinyurl.com/22ge2plq

Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2016). Plan integral de gestión del cambio climático territorial del Departamento de Cauca 2040. *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.* https://tinyurl.com/2auauk5y

CRC (2018). *Determinación del índice de escasez y tasa por uso del agua: Río Mandivá.* Corporación Autónoma Regional del Cauca.

DESINVENTAR.ORG (2020). *Inventario histórico nacional de desastres por movimientos en masa 1921-2017* [Conjunto de datos]. Corporación OSSO. https://db.desinventar.org/

Díaz-Delgado, C. (s. f.). *Evaluación del riego de inundación, sistemas de alerta temprana y diseño de procesos de logística humanitaria*. Universidad Autónoma del Estado de México. https://tinyurl.com/2aa4c42w

DNP (2002). *Lineamientos y Agenda para la Adaptación al Cambio Climático en Colombia*. Departamento Nacional de Planeación.

Figueroa, F., Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., y Linaje, M. (2011). Evaluación de la efectividad de las áreas protegidas para contener procesos de cambio en el uso del suelo y la vegetación. ¿Un índice es suficiente? *Revista mexicana de biodiversidad, 82*(3), 951-963. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1870-34532011000300020&lng=es&nrm=iso&tlng=es

Folke, C., Hahn, T., Olsson, P., y Norberg, J. (2005). Adaptive governance of social-ecological systems. *Annual Review of Environment and Resources, 30*(1), 441-473. https://doi.org/10.1146/annurev.energy.30.050504.144511

Gómez, E. M. e Hidalgo A.M. (2020). *Determinación de la vulnerabilidad del sector frutícola al cambio climático en las comunas de la región de Coquimbo*.

Heltberg, R., Siegel, P. B., y Jorgensen, S. L. (2009). Addressing human vulnerability to climate change: Toward a 'no-regrets' approach. *Global Environmental Change, 19*(1), 89-99. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.11.003

IDEAM (2010). *Segunda comunicación Nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático: República de Colombia*. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/021658/021658.htm

IDEAM, y UNAL (2018). *La variabilidad climática y el cambio climático en Colombia. Instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales*. https://tinyurl.com/259x29vz

IPCC (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II, III al quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático*. IPCC. https://tinyurl.com/qktl7h6

Liu, J., Dietz, T., Carpenter, S. R., Alberti, M., Folke, C., Moran, E., Pell, A. N., Deadman, P., Kratz, T., Lubchenco, J., Ostrom, E., Ouyang, Z., Provencher, W., Redman, C. L., Schneider, S. H., y Taylor, W. W. (2007). *Complexity of Coupled Human and Natural Systems. Science,* 317(5844), 1513-1516. https://doi.org/10.1126/science.1144004

McCarthy, J. J., Canziani, O. F., Leary, N. A., Dokken, D. J., y White, K. S. (Eds.) (2001). *Climate change 2001: Impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of working group II to the third assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge University Press. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WGII_TAR_full_report-2.pdf

Niang, C. I., Tapsoba, P., Weiss, E., Diagne, M., Niang, Y., Moreau, A. M., Gomis, D., Wade, A. S., Seck, K., y Castle, C. (2003). 'It's raining stones': Stigma, violence and HIV vulnerability among men who have sex with men in Dakar, Senegal. *Culture,*

Health & Sexuality, 5(6), 499-512. https://doi.org/10.1080/1369105031000152715

Niasse, M. (2005). Climate-Induced water conflict risks in west Africa: Recognizing and coping with increasing climate impacts on shared watercourses. *Human Security and Climate Change*.

Nur, N., Salas, L., Veloz, S., Wood, J., Liu, L., y Ballard, G. (2012). Assessing vulnerability of tidal marsh birds to climate change through the analysis of population dynamics and viability. Technical Report. Version 1.0. *Report to the California Landscape Conservation Cooperative*. PRBO Conservation Science. https://www.sciencebase.gov/catalog/item/5a04c585e4b0dc0b45b50884

OECD (1994). *OECD Test Guidelines for Chemicals.* https://www.oecd.org/chemicalsafety/testing/oecdguidelinesforthetestingofchemicals.htm

Ortiz, R. (2012). *El cambio climático y la producción agrícola.* Banco Interamericano de Desarrollo. https://tinyurl.com/26q3mylr

Perfecto, I., Vandermeer, J., y Wright, A. (2019). *Nature's Matrix: Linking agriculture, biodiversity conservation and food sovereignty* (2.a ed.). Routledge. https://www.routledge.com/Natures-Matrix-Linking-Agriculture-Biodiversity-Conservation-and-Food/Perfecto-Vandermeer-Wright/p/book/9780367137816

Saadatseresht, M., Mansourian, A., y Taleai, M. (2009). Evacuation planning using multiobjective evolutionary optimization approach. *European Journal of Operational Research, 198*(1), 305-314. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2008.07.032

Serrano Caldera, A. (2005). Ética y Política. Polis. *Revista Latinoamericana, 4*(10), Article 10. https://journals.openedition.org/polis/7541

Tobón, C. (2009). *Los bosques andinos y el agua. Programa Regional Andino de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación Internacional.*

UNEP. (2002). *Report of the global mercury assessment working group on the work of Its first meeting*. United Nations. https://digitallibrary.un.org/record/485902

Vargas-Franco, V., y Restrepo-Tarquino, I. (2018). Construcción de índice con inteligencia artificial para evaluar vulnerabilidad al cambio climático en microcuencas andinas tropicales. Caso de estudio en Colombia. *DYNA, 85*(204), 194-203. https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.67048

Walker, B. H. (1992). Biodiversity and Ecological Redundancy. *Conservation Biology, 6*(1), 18-23. https://www.jstor.org/stable/2385847

Capítulo 19. Curvas de daños para la estimación del impacto económico por penetraciones del mar en el Malecón Tradicional de La Habana, Cuba

Kenia Hernández Valdésez [1]
Willian Olivera Azcanio [2]
María de los Ángeles Zamora Fernández [3]

Introducción

Las inundaciones son los desastres causados por fenómenos naturales que más daños provocan en diferentes sectores como vivienda, comercio, agricultura, turismo e industria, generando grandes impactos económicos y sociales en cortos períodos de tiempo. Los daños generados por la inundación son una función de la extensión de la inundación, pero también dependen de su duración, velocidad, profundidad y la contaminación de las aguas (Merz, Kreibich, Schwarze, y Thieken, 2010). Las pérdidas económicas derivadas de inundaciones en zonas urbanas son cada vez más relevantes acorde con los cambios socioeconómicos producidos, tales como el crecimiento de la población y la mayor densidad de infraestructuras en las ciudades (United Nations, 2019).

1 Ingeniera Civil. Empresa Inversiones Gamma S.A. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba.

2 Master en Geografía. Empresa Inversiones Gamma S.A. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba.

3 Licenciada en Meteorologia. Empresa Inversiones Gamma S.A. Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. La Habana, Cuba

Para reducir los daños ocasionados por las inundaciones pueden adoptarse medidas tanto estructurales como no estructurales. Las medidas estructurales consisten en la ejecución de obras de infraestructura que actúan sobre los mecanismos de generación y propagación, alterando sus características hidrológicas o hidráulicas como la construcción de encauzamientos de ríos, muros de protección costera, rompeolas o diques de protección. Por otro lado, las medidas no estructurales son aquellas que modifican la susceptibilidad de la zona inundable frente a los daños como planes de protección civil, implantación de sistemas de alerta temprana o medidas de ordenación del territorio.

La implementación de estas medidas resulta ser muy costosa, por lo que se hace necesario la evaluación en términos monetarios de los potenciales daños de inundación que puedan incorporarse a los estudios de costo-beneficio para la propuesta de soluciones más viables. En este trabajo se proponen las curvas de calado-daño como herramientas para la valoración del riesgo de inundación por penetraciones del mar.

1. Área de estudio malecón Tradicional de La Habana

El área de estudio comprende el sector denominado Malecón Tradicional (Figura 1) compuesto por catorce manzanas que constituyen la terminación en el litoral del tejido urbano compacto de Centro Habana. En correspondencia con la trama vial, las manzanas con un formato rectangular con un frente variable entre 169 y 52 m, con las más largas hacia los extremos y una profundidad que oscila entre 48 y 37 m (Oficina del Historiador de Ciudad de La Habana, 2014).

Figura 1. Imagen satelital del área de estudio



Fuente: *Google Earth*.

Los asentamientos poblacionales del área se encuentran estrechamente vinculados a la fundación de la Villa de San Cristóbal de La Habana (1514-1519).

Desde la conformación inicial de la ciudad, predominó la función residencial definiendo el carácter homogéneo y formal de las manzanas. Su desarrollo se basó en edificaciones de dos y tres plantas con viviendas unifamiliares y a partir de los años 1920 incluyendo edificios de apartamentos con la inserción de modernos códigos en los años 30. No se encuentran otras tipologías como la religiosa o la industrial, existiendo únicamente la civil pública en edificaciones principalmente en la calle San lázaro con tipologías mixtas por la combinación de servicios comerciales en las plantas bajas y viviendas en altos.

En el siglo XX, el territorio se convierte en el corazón del comercio y los servicios, al calor de la iniciativa privada y la injerencia en el país del capital extranjero, evidenciado con la presencia de la *Cuban Telephone Company* y la Compañía de Electricidad en conjunto con las fábricas de jabones, perfumes, goma neumática, mosaicos y refrescos. También se desarrollan tendencias arquitectónicas como el *Eclecticismo* y *Art-decó* surgidas en Europa, las cuales quedaron incluidas en el tesoro cultural del país.

La mayor parte de los edificios comenzando por la calle de San Lázaro y continuando con sus ampliaciones hacia el frente del malecón fueron construidos con anterioridad a 1920 lo que representa un 77 %. Entre los años 1920 y 1940, se construyó el 14 % y desde 1940 a 1950 el 9 % de las edificaciones (Oficina del Historiador de Ciudad de La Habana, 2014).

En la actualidad, el fondo construido presenta un elevado deterioro (Figura 2) marcado por la edad de las edificaciones y por la ausencia de mantenimientos periódicos, debido, entre otras causas, a la escasez de materiales y su alto costo, así como a la agresividad del medio por la presencia de aerosoles marinos, lo que se agrava aún más con el pasar de los años. Entre las variables que influyen en el clima urbano se encuentran la contaminación atmosférica asociada al transporte automotor, el aerosol marino, la radiación solar en una trama urbana compacta con grandes superficies pavimentadas, las precipitaciones, el ruido relacionado con el carácter de vía rápida del malecón, las áreas verdes prácticamente inexistentes, la acción del oleaje, los vientos y las penetraciones del mar.

Figura 2. Fondo construido con elevado deterioro y cuantiosos derrumbes



Fuente: fotografía tomada por los autores.

Durante las últimas décadas han sucedido cuantiosos derrumbes que han llevado a la demolición parcial o total de numerosos inmuebles y el traslado de la población hacia comunidades de tránsito. Una parte considerable de las edificaciones están sobreexplotadas, pues fueron concebidas como viviendas unifamiliares y se han convertido en casas de vecindad, habitadas por numerosas familias, sin contar con área suficiente para ello, ni con una infraestructura y normativas técnicas apropiadas.

El malecón, considerado como arteria principal de la ciudad, constituye el eje fundamental del tráfico rodado en la dirección este-oeste. La sección transversal se mantiene constante en la mayor parte del tramo con un ancho total de 30 m de doble sentido, con tres carriles cada uno. Las aceras tienen un ancho promedio de 5 m que se amplían hasta los 13 m en los miradores o terrazas.

Su carácter de obra de contención costera lo expone a los constantes embates del oleaje y a recurrentes inundaciones por el rebase del mar (Figura 3), lo que, unido a más de un siglo de construcción, favorece la ocurrencia de socavaciones de la base y los cimientos, agrietamientos, hundimiento y fractura de aceras entre otros daños y en casos severos, provocar la fractura del muro comprometiendo la estabilidad de la estructura, lo que pone en peligro su existencia como espacio y conjunto urbano, sumado a la influencia de cambios climáticos globales y complejos, cuyos impactos tienden a agudizar esta problemática.

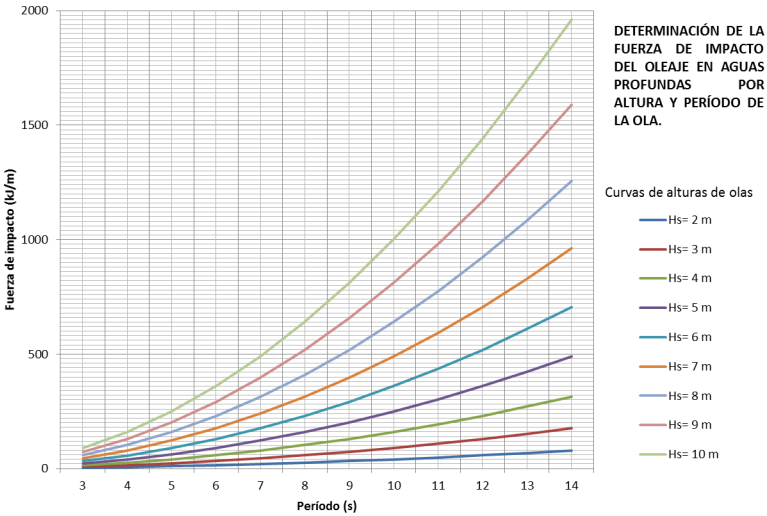
Figura 3 Rebases sobre el muro del malecón y daños producidos en aceras y muro por el accionar del oleaje



Fuente: Cubadebate, 2023.

El efecto del impacto del oleaje como carga hidrodinámica se observa de manera significativa sobre el muro que recibe cargas múltiples y repetidas en corto tiempo, lo que ha sido estudiado por Casals Taylor, y otros (2019), quienes establecieron un nomograma que asocia la altura de ola significativa y su período con los valores correspondientes de potencia del impacto del oleaje sobre el fondo marino y las estructuras de protección, a partir de la aplicación de la teoría lineal del oleaje (Figura 4).

Figura 4. Curvas de fuerza de impacto del oleaje en aguas profundas frente al malecón habanero, de acuerdo con la altura significativa y el período



Fuente: tomado de Casals Taylor, y otros, 2019.

Estos autores plantean las características del oleaje durante el huracán Irma, la fuerza de impacto sobre el fondo marino y la estructura del muro osciló entre 34 y 47 kilo Joule por metro lineal de cresta. Estas condiciones de oleaje extremo se extendieron por espacio de unas 14 horas, contribuyendo a la ocurrencia de unas inundaciones que superaron la gran mayoría de los límites máximos establecidos por otros eventos clasificados como fuertes para el litoral de La Habana.

Atendiendo a que el muro del malecón constituye una obra de protección costera para la ciudad urbanizada que impide la incidencia directa del oleaje sobre las edificaciones y los daños que cada vez sufre la urbe y el propio muro por las penetraciones del mar, haciendo necesario estudiar modificaciones en su diseño o la implementación de obras complementarias que contribuyan a reducir el impacto directo del oleaje y a su vez, las tasas de rebase.

2. Cálculo de las curvas de daños

Los daños derivados de una inundación son múltiples y se clasifican en la literatura como tangibles e intangibles, los cuales pueden ser directos o indirectos (Merz, Kreibich, Schwarze, y Thieken, 2010), (Baró Suarez, Díaz Delgado, Calderón Aragón, Esteller Alberich, y Cadena Vargas, 2012), (Velasco, Cabello, y Russo, 2016). Los daños tangibles abarcan aquellos que pueden ser fácilmente cuantificables en términos monetarios como el daño físico a la propiedad y los contenidos. Incluye categorías tales como los impactos en la salud o el medio ambiente donde es poco probable que exista un consenso sobre los valores exactos. Otra forma es decir que el daño tangible relaciona bienes donde existe un valor de mercado, mientras el daño intangible se relaciona con aquellos bienes para los que no existe aún un valor de mercado.

La segunda distinción entre daños directos e indirectos. Los daños directos son aquellos que resultan del contacto directo del agua de la inundación con el objeto afectado valorando por medio de los costes de reposición, reparación o rehabilitación de los bienes afectados, lo que contrasta con los daños indirectos existiendo cierta distancia espacial y temporal entre la inundación y el daño.

2.1. Determinación de daños tangibles directos en edificaciones con función residencial

Para evaluar el daño tangible directo en las edificaciones con función residencial, se tomaron como valores referenciales los establecidos en la Gaceta Oficial de la República de Cuba (GOC-348-Ex16, 2017), atendiendo a las características constructivas, al lugar de ubicación y a la cantidad de dormitorios que presenta, como se observa en el cuadro 1.

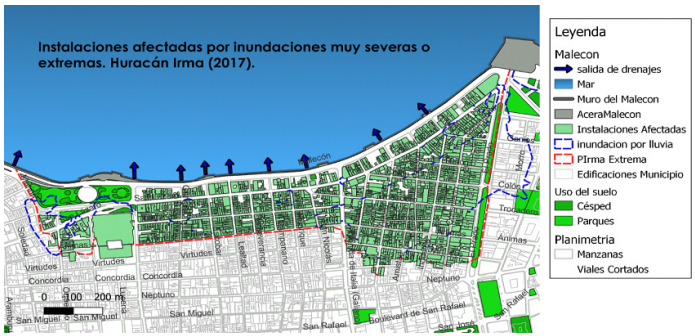
Cuadro 1. Valor referencial de apartamentos (Paredes de mampostería y cubierta pesada). Valor referencial considerando coeficiente de ubicación para Centro Habana

Vivienda	Valor referencial (cup)
Un dormitorio	60 000.00
Dos dormitorios	120 000.00
Tres dormitorios	180 000.00
Cuatro dormitorios o más	240 000.00

Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

Las áreas de inundación responden a las producidas por el huracán Irma como límite máximo de penetración marina, y las áreas de inundación por intensas lluvias dentro del territorio. Se confeccionó un mapa de peligros múltiples, que combina las penetraciones marinas y las lluvias máximas registradas en el territorio con los "elementos expuestos" ubicados en zonas vulnerables a esos peligros, a partir la altura del agua, lo que permite conocer o pronosticar el grado de afectación a las edificaciones, mostrado en la figura 5.

Figura 5. Instalaciones afectadas por inundaciones muy severas o extremas. Huracán Irma, 2017



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

Con el empleo del Modelo Digital del Terreno en un Sistema de Información Geográfico, se identificaron las viviendas afectadas durante la inundación representadas por polígonos individuales que contienen atributos asociados como el año de construcción, tipología constructiva, estado técnico y área que ocupa, con lo que fue confeccionada el cuadro 2.

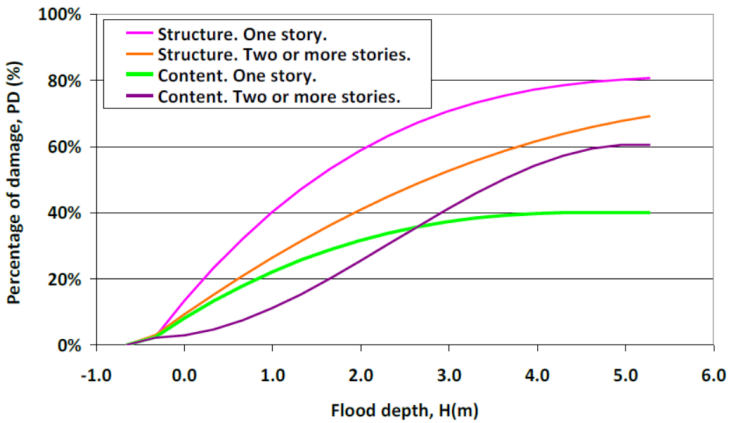
Cuadro 2. Valores referenciales de las viviendas afectadas por el huracán Irma

Vivienda	Cantidad	Valor referencial (cup)	Valor viviendas (cup)
Un dormitorio	2579	60 000	154 740 000
Dos dormitorios	993	120 000	119 160 000
Tres dormitorios	784	180 000	141 660 000
Cuatro dormitorios	263	240 000	63 120 000
> Cuatro dormitorios	636	240 000	152 640 000
	TOTAL		630 780.000

Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

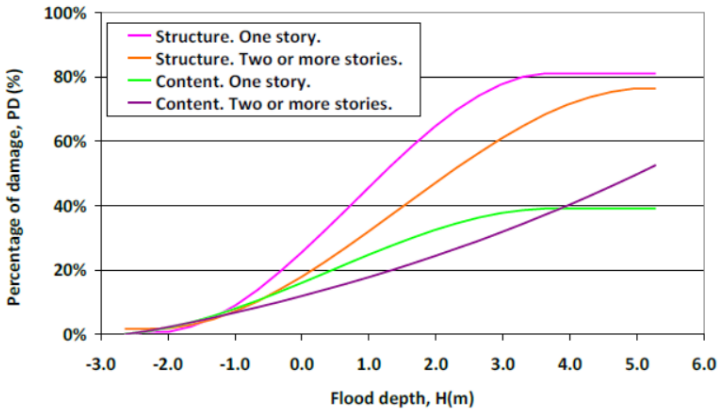
Para la estimación de los daños directos se tuvo en cuenta la afectación estructural, considerando que no se produce el colapso de la edificación, tomándo como valor máximo de daños el 40% del valor de la vivienda, atendiendo al estado constructivo en que se encuentran la mayoría de las edificaciones y a los años de explotación que sobrepasan la vida útil de diseño. Debe destacarse que este valor se encuentra dentro de los referidos por (USACE, 2000; USACE, 2003) para la elaboración de las curvas calado-daños, han sido establecidos como referencia dentro de la metodología del proyecto europeo *Strategies of Urban Flood Risk Management* (SUFRI, 2011) reflejadas en la figura 6 y en la figura 7 (Figura 8, 9 y 10) (Cuadro 3).

Figura 6. Curva calado-daños para edificaciones sin sótano (USACE, 2000)



Fuente: tomado de SUFRI, 2011.

Figura 7. Curva calado-daños para edificaciones con sótano (USACE, 2003)



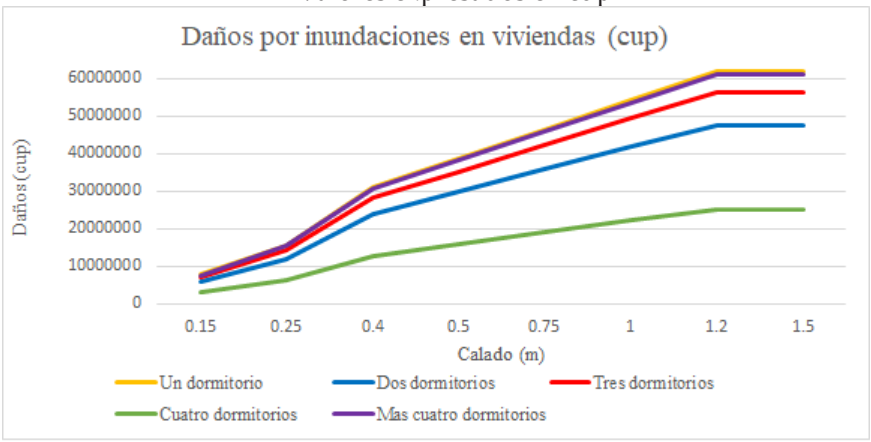
Fuente: tomado de SUFRI, 2011.

Cuadro 3. Resumen de daños por inundación en edificaciones utilizadas como vivienda

Vivienda	Cantidad	Daños (cup)	Daños (cup/m^2)
Un dormitorio	2579	61 896.000	4 423.11
Dos dormitorios	993	47 664.000	4 886.54
Tres dormitorios	784	56 448.000	4 743.78
Cuatro dormitorios	263	25 248.000	3 547.58
> Cuatro dormitorios	636	61,056.000	794.45
TOTAL		252 312 000.00	18 395.47

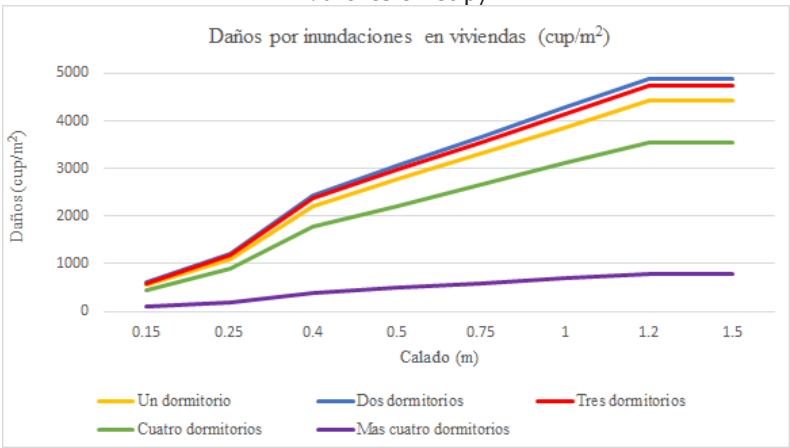
Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

Figura 8. Curvas de daños por inundaciones en viviendas. Valores expresados en cup



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

Figura 9. Curvas de daños por inundaciones en viviendas. Valores en cup/m²



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

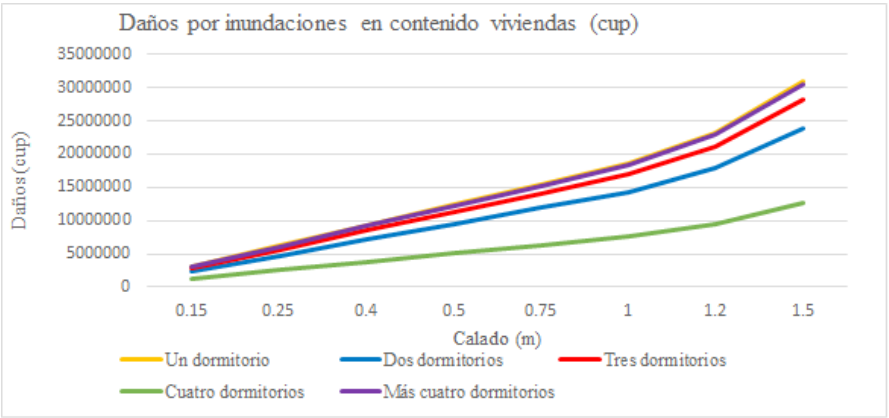
Figura 10. Pérdidas máximas esperadas por instalación para el malecón tradicional



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

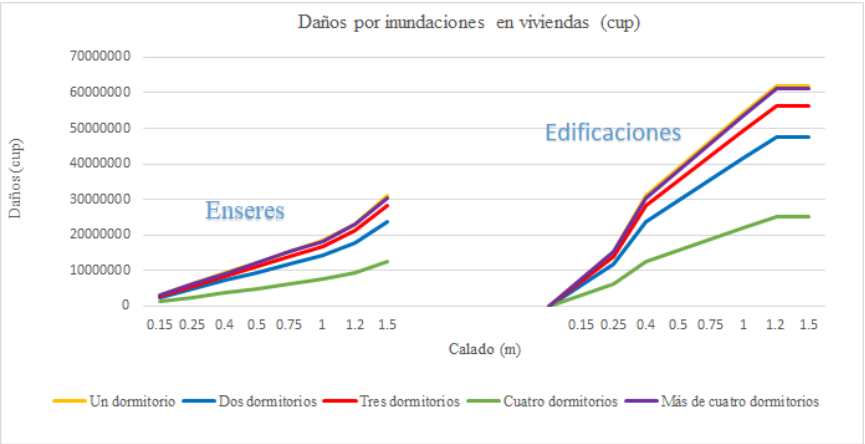
El cálculo de las pérdidas por daños en pertenencias como muebles, ropa y calzado (contenido), se realizó considerando que las afectaciones se producen en un porcentaje del 20 %, resultados que se muestran en la figura 11. El cuadro 4 resume los daños directos tanto para las edificaciones de vivienda como en su contenido (Figura 12).

Figura 11. Curvas de daños por inundaciones en el contenido de las viviendas. Los valores son expresados en cup



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

Figura 12. Daños directos por inundaciones en edificaciones de vivienda y su contenido



Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

Cuadro 4. Resumen de daños directos en edificaciones de viviendas y su contenido

Vivienda	Daños en viviendas cup	Daños al contenido cup	Daño Total cup
Un dormitorio	61 896 000.00	30 948 000.00	92 844 000.00
Dos dormitorios	47 664 000.00	23 832 000.00	71 496000.00
Tres dormitorios	56 448 000.00	28 224 000.00	84 672 000.00
Cuatro dormitorios	25 248 000.00	12 624 000.00	37 872 000.00
> Cuatro dormitorios	61 056 000.00	30 528 000.00	91 584 000.00
TOTAL	252 312 000.00	126 156 000.00	378 468 000.00

Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

Debe destacarse la metodología desarrollada en el presente trabajo para determinar las curvas de daños por inundaciones con la estimación del impacto económico en edificaciones de viviendas y su contenido, puede ser aplicada en los diferentes municipios de la ciudad con problemáticas similares.

2.2. Determinación de daños tangibles directos en muro de protección costera y viales.

El muro del malecón se encuentra expuesto a riesgos la mayor parte del año, ya que es afectado durante la etapa invernal (diciembre - abril) por la llegada de frentes fríos y bajas extratropicales, mientras que durante los meses de junio a noviembre se enfrenta a la temporada ciclónica.

La influencia de fenómenos meteorológicos y variables geográficas en el deterioro del malecón habanero es analizada por Remond, Aguilar, Alfonso, y Martínez (2018) diferenciando zonas vulnerables y menos vulnerables atendiendo a sus características y niveles de deterioro, encontrándose la zona de estudio incluida dentro de las más vulnerables al deterioro (Figura 13).

Figura 13. Zonas del malecón vulnerables al deterioro



Fuente: tomado de Remond, Aguilar, Alfonso, y Martínez, 2018.

Las experiencias sobre las afectaciones que produce el impacto del oleaje sobre el muro del malecón, permiten estimar que como promedio se dañan 500 m de muro por cada penetración del mar de categoría severa (cada 9 años según frecuencia).

El cuadro 5 refleja los montos que deben derogarse cada nueve años aproximadamente para ejecutar las reparaciones en el muro del malecón y el vial, debido a los daños causados por las penetraciones severas atendiendo a los indicadores presupuestarios dados por la Empresa de Servicios Ingenieros Hidráulicos Occidente ESIHO.

Cuadro 5. Costos por reparación de daños tangibles directos en el muro de protección costera y vial

Indicadores (cup)	Longitud a reparar (m)	Costo (cup)
Por metro lineal 49 362.28/m	500	24 681 140.00

Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

2.3. Daños tangibles indirectos

Los daños o costos indirectos son difíciles de estimar, en ocasiones son cuantificados en forma de un porcentaje determinado de los daños directos. Diversos autores asumen que los daños indirectos en las propiedades de tipo residencial suponen un 15 % de los daños directos sufridos por estas, mientras que, en el caso de las propiedades industriales y comerciales, estiman que los primeros ocupan el 33 % de los daños directos causados en ellas. Otros autores establecen diversos valores, como se observa en el cuadro 6.

Cuadro 6. Estimaciones de costos indirectos por inundaciones en porcentajes de los costos directos

Autor	Elemento afectado	% sobre costos directos
(Kates, 1965)	Edificios residenciales	15
	Edificios comerciales	35
	Edificios industriales	45
	Servicios públicos	10
	Propiedades públicas	34
	Viales	25
(Smith, Handmer, Greenaway, y Lusting, 1990)	Edificios comerciales	55
	Edificios industriales	55

Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

El cuadro 7 refleja los daños tangibles totales, considerando tanto los daños directos como los daños indirectos, utilizando en la cuantificación para estos últimos el criterio dado por (Kates, 1965) con el empleo del 15 % sobre los costos directos.

El cuadro 7 muestra los daños tangibles totales por afectaciones en el fondo habitacional y en el muro de protección costera, ya bastantes deteriorados por el paso del tiempo, del sector de estudio correspondiente al Malecón Tradicional durante la ocurrencia de eventos meteorológicos con similares características al huracán Irma.

Cuadro 7. Daños tangibles totales (directos e indirectos), expresados en cup

Daños directos (cup)		Daños indirectos (cup)	Daño tangible total (cup)
Vivienda y contenido	378 468 000.00	56 770 200.00	435 238 200.00
Muro del malecón	24 681 140.00	3 702 171.00	28 383 311.000
TOTAL	403 149 140.00	60 472 371.00	463 621 511.00

Fuente: elaboración propia, con base en datos de Inversiones Gamma S.A.

Si se toman en consideración, además, las afectaciones por daños intangibles, como son las pérdidas de vidas, afectación en la salud de las personas, daños ambientales entre otros, que no han sido posibles determinar, las pérdidas superan los 463 621.511 millones de cup.

Conclusiones

La implementación de las curvas calado-daños para las edificaciones residenciales ha permitido cuantificar los daños ocasionados por las inundaciones en función de la altura que alcanza el agua en el sector Malecón Tradicional. Esta información constituye el punto de partida para la realización de los análisis costo-beneficio en la propuesta de medidas estructurales y no estructurales dirigidas a la reducción de las inundaciones.

El cálculo y estimación de los daños permite concluir que resulta de suma importancia el estudio, diseño y ejecución de obras que contribuyan a reducir las tasas de rebase que actualmente se presentan sobre el muro del malecón, y que a su vez garanticen la rápida evacuación y drenaje de las aguas en las zonas más bajas y vulnerables ante inundaciones.

La estimación de las pérdidas económicas utilizando estas curvas debe ser aplicada no solo al sector residencial, sino también en instalaciones hospitalarias, comerciales, hoteleras e industriales con la finalidad de cuantificar los daños de manera más precisa.

Bibliografía

Baró Suarez, J. E., Díaz Delgado, C., Calderón Aragón, G., Esteller Alberich, M. V., y Cadena Vargas, E. (2012). *Metodologia para la valoración de daños potenciales tangibles directos por inundación*.

Casals Taylor, R., Hernández Orozco, N., Perez Osorio, P., Ernesto Ortega, F., Perez Parrado, R., Menéndez Fernández, L., y Mosqueda Borges, N. (2019). Inundaciones costeras provocadas por el huracán Irma en el malecón habanero los días 9 y 10 de septiembre 2017. *Revista Cunbana de Meteorología*, 244-255.

GOC-348-Ex16. (2017). *Gaceta Oficial de la República de Cuba*. Editora Mayor Gene-

ral Ignacio Agramonte y Loynaz.

Kates, R. (1965). *Industrial flood losses: Damage estimation in Lehigh Valley*. University of Chicago.

Merz, B., Kreibich, H., Schwarze, R., y Thieken, A. (2010). Assessment of economic flood damage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 1697-1724.

Oficina del Historiador de Ciudad de La Habana. (2014). *El Malecon Tradicional. Plan Especial de Rehabilitación Integral. Regulaciones Urbanísticas. Centro Habana.* Ediciones Boloña.

Remond, R., Aguilar, K., Alfonso, C., y Martínez, J. F. (2018). Influencia de fenómenos meteorológicos y variables geográficas en el deterioro del malecon habanero. *Boletin de la Asociacion de Geografos españoles*, 256-282.

SUFRI. (2011). *Sustainable Strategies of Urban Flood Risk Management SUFRI.* Universidad Politécnica de Valencia.

United Nations. (2019). *World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*. United Nations.

USACE. (2000). *Economic Guidance memorandum 01-03. Generic depth damage relationships.* USACE.

USACE. (2003). Generic depth damage relationships for residencial structures whith basements. *Economic Guidance Memorandum 04-01*. Whashington DC: USACE.

Velasco, M., Cabello, A., y Russo, B. (2016). Flood damage assessment in urban areas. Aplication to the Raval district of Barcelona using synthetic depth damage curves. *Urban Water Journal*, Volume 13, Issue 4, 426-440.

Reflexiones finales

En atención al objetivo de la presente obra se transmite mediante problemáticas trascendentales para la sociedad en el ámbito de la Geología Ambiental y los Recursos Hídricos, los casos de estudios desarrollados que ofrecieron recursos metodológicos en el ámbito operativo e investigativo. Los temas abordados tributan notablemente al Programa Nacional Estratégico "Sistemas Socioecológicos y Sustentabilidad" impulsado por el Consejo Nacional de Humanidades Ciencias y Tenológias (CONAHCYT) de México.

El libro intenta ofrecer herramientas técnicas a las autoridades locales y conocimiento general a la población, con el propósito de alcanzar consenso y promover el equilibrio ecológico, bajo un enfoque de sustentabilidad.

Por último, pretendemos que esta obra se convierta en un texto que contribuya a la formación de recursos humanos en el ámbito de las Ciencias Ambientales y las Ciencias de la Tierra.



GEOLOGÍA AMBIENTAL
Y RECURSOS HÍDRICOS
se terminó de editar en
diciembre de 2023
en Cromberger Editores.

ISBN: 978-6-07589-210-8

La gestión del territorio enfrenta retos que exigen la intervención multidisciplinar. Las inconsistencias en el manejo de los recursos naturales y planeación del territorio han propiciado escenarios de riesgos que anualmente cobran miles de víctimas en el mundo. La Geología Ambiental y los Recursos Hídricos forman dimensiones trascendentales para comprender los fenómenos naturales que se desencadenan en los diferentes escenarios geográficos. Actualmente, las comunidades en México experimentan el impacto de inundaciones, huracanes, sismos, deslizamientos en laderas, desabastecimiento de agua, contaminación de los recursos hídricos y sobreexplotación de acuíferos, entre otros, que nos alejan del camino hacia la sostenibilidad. En respuesta a lo anterior, esta obra tiene como objetivo plantear una serie de problemáticas en el ámbito de la geología ambiental y del manejo de los recursos hídricos, a través de casos de estudio, así como sus soluciones, de forma tal que el lector tenga una referencia para su formación y desarrollo profesional.

iidear
Observatorio Sismológico y Geofísico del Suroccidente Colombiano - OSSO
Universidad del Valle
Colegio Mexicano de Profesionales en Gestión de Riesgos y Protección Civil A.C.
RETESyG
CONACYT
CROMBERGER EDITORES E IMPRESORES