

Revista internacional revisada por pares que contiene resultados originales de investigación en todas las áreas de las ciencias para el Cambio Climático.

An international, peer-reviewed journal that contains original research findings in all areas of science for Climate Change.

REVISTA

JAINA



COSTAS Y MARES ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Vol. 7 (1) 2025



ISSN :0188-4700

JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático, es una publicación internacional dedicada al estudio de todos los aspectos relacionados con el conocimiento científico para el cambio climático a nivel internacional, regional, nacional y local. El uso y la conservación de los recursos costeros y marinos, incluyendo recursos de ecosistemas dulceacuícolas, requieren de un enfoque multidisciplinario, desde las ciencias naturales hasta las ciencias físicas, químicas, así como del análisis político, económico y social.

DIRECTORIO EDITORIAL

Editor en Jefe / Editor in Chief

Dr. Yassir Edén Torres Rojas

Editores Asociados / Associate Editors

Dra. Claudia M. Agraz Hernández
Dr. Rodolfo Enrique del Río Rodríguez
Dr. Ricardo Dzul Caamal
Dr. Maurilio Lara Flores
Dr. Edgar F. Mendoza Franco
Dr. Gregorio Posada Vanega
Dra. Evelia Rivera Arriaga
Dr. Jaime Rendón Von Osten
Dra. Beatriz Edith Vega Serratos

Coordinación Editorial / Editorial Coordinator

ME Jorge Gutiérrez Lara

Diseño Gráfico

DG Juan M. Matú Fierros

JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático, es una publicación con dos números anuales. Es una publicación editada por la Universidad autónoma de Campeche. Av. Agustín Melgar S/N entre Calle 20 y Juan de la Barrera. Col. Buenavista. CP 24039. Tel. +52(981) 8119800; <https://jainacc.uacam.mx>. Editor responsable: Dr. Yassir edén Torres Rojas. ISSN 0188-4700 Universidad Autónoma de Campeche Av. Agustín Melgar S/N entre Calle 20 y Juan de la Barrera. Col. Buenavista. CP 24039. fecha de última modificación 15 de junio de 2019.

COMITÉ EDITORIAL / EDITORIAL BOARD

Dr. Francisco Arreguín
CICIMAR-IPN, México

Dr. Luis Amado Ayala Pérez
UAM-Xochimilco, México

Dr. Milton Azmus,
Universidad de Sao Paulo,
Brasil

Dr. Isaac Azuz-Adeath
CETYS-universidad, México

Dr. Ángel Campa Córdova
CIBNOR, México

Dra. Sandra Cassotta
Aalborg Uniiver., Dinamarca

Dr. Martha I. Espejel Carbajal
UABC, México

Dra. Julia Fraga
CINVESTAV-Mérida, México

Dr. Daniel Geartner
Institute of Research
for Development

Dr. Pierre Marie Kaktcham
Université de Dschang,
Camerún

Dr. Basilio Lara Chávez
UABC, México

Dr. Antonio Luna González
CIIDIR-IPN, México

Dr. David J. Marcogliese
McGill University, Canadá

Dr. Andrés Martínez-Aquino<
UNAM, México

Dr. Eduardo Mendes da Silva
Universidad de Bahia, Brasil

Dr. Edgar Mendoza Baldwin
UNAM, México

Dr. Adrián Quintero Gutiérrez
IPN, México

Dra. Silvia Salas
CINVESTAV-Mérida, México

Dr. Guillermo Salgado
UNAM, México

Dr. Alfonso V Botello
UNAM, México

JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático

esta soportado por:

OJS

Open Journal System

...en este número

- Avances y perspectivas en el estudio del fitoplancton nocivo en el litoral de Campeche, sureste del golfo de México** 5
Advances and perspectives in the study of harmful phytoplankton on the coast of Campeche, southeastern Gulf of Mexico
Carlos Antonio Poot-Delgado, Jaime Rendon-von Ostén, Yuri B. Okolodkov, Erick J. Núñez-Vázquez y Alfredo Pérez-Mora
- Presencia de *Diplostomum* en las cámaras oculares de peces de la zona estuarina de Chachalacas, Veracruz** 19
Presence of *Diplostomum* in the eye chambers of fish from the estuarine zone of Chachalacas, Veracruz
Mitzi Elizabeth Ruiz Villegas, Paulina Estefanía Chávez Mata, José Antonio Mata Sotres y María del Carmen Monroy Dosta
- Diagnóstico del Manejo Integrado Costero en Manzanillo, Colima: gobernanza, modelos de evaluación y estrategias de resiliencia** 27
Diagnosis of Integrated Coastal Management in Manzanillo, Colima: governance, evaluation models, and resilience strategies
Karianna A. Aké Turriza, Osmar D. Cahuich Cruz, Marina Díaz Lázaro, Oscar O. Mas Qui, Javier A Pan Barcel, Evelia Rivera-Arriaga y Angelina C. Peña-Puch
- Glifosato en Tizimín: agricultura y apicultura** 55
Glyphosate in Tizimín: Agriculture and Beekeeping
José A. Noh-Medina, Merle M. Borges-Ramírez, Juan J. Sandoval-Gio, Aaron Peregrina-Lucano, Emmanuel Helguera, Omar Arellano-Aguilar y Jaime Rendón-von Osten
- Artículo de revisión / Review article:**
Islas de calor urbanas bajo escenarios de cambio climático 67
Urban heat islands under climate change scenarios
Karianna A. Aké Turriza y Evelia Rivera-Arriaga

Poot-Delgado, C.A, Rendon-von Ostén, J., y Okolodkov, Y.B., Núñez-Vázquez, E.J., y Pérez-Morales, A. 2025. Avances y perspectivas en el estudio del fitoplancton nocivo en el litoral de Campeche, sureste del golfo de México. JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático 7(1): 5-18. doi 10.26359/52462.0701



Avances y perspectivas en el estudio del fitoplancton nocivo en el litoral de Campeche, sureste del golfo de México

Advances and perspectives in the study of harmful phytoplankton on the coast of Campeche, southeastern Gulf of Mexico

Carlos Antonio Poot-Delgado^{1,2}, Jaime Rendon-von Ostén¹, Yuri B. Okolodkov³, Erick J. Núñez-Vázquez⁴ y Alfredo Pérez-Morales⁵*

¹ Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX), Universidad Autónoma de Campeche

² Tecnológico Nacional de México / ITS de Champotón

³ Laboratorio de Botánica Marina y Planctología, Instituto de Ciencias Marinas y Pesquerías, Universidad Veracruzana

⁴ Laboratorio de Toxinas Marinas y Aminoácidos, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste

⁵ Centro Universitario de Investigaciones Oceanológicas, Universidad de Colima

* autor de correspondencia: cpoot35@gmail.com

doi 10.26359/52462.0701

Recibido 04/octubre/2024. Aceptado 20/abril/2025

JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático

Coordinación editorial de este número: Yassir E. Torres Rojas

Este es un artículo bajo licencia Creative Commons CC BY-NC-ND.



Resumen

El crecimiento de la población humana acelerado en los estados costeros de México, que alcanzará 64 millones en 2030, ejerce una marcada presión ambiental sobre las zonas costeras, donde actividades productivas y recreativas antropogénicas afectan el equilibrio ecológico. El fitoplancton es altamente susceptible a estas alteraciones, principalmente, a la respuesta del incremento de nutrientes que obedece a este crecimiento acelerado de las poblaciones humanas, afectando la red trófica. En México, los florecimientos algales nocivos (FAN) representan un serio problema ambiental y de salud pública, regulado por una normativa desactualizada. En las aguas costeras del estado de Campeche, con un litoral de 425 km, se han realizado diversos esfuerzos para identificar especies fitoplanctónicas conocidas por formar FAN. Diatomeas del género *Pseudo-nitzschia*, y el dinoflagelado teicado *Pyrodinium bahamense* han sido identificadas de forma recurrente y en menor medida, el dinoflagelado “desnudo” *Karenia brevis* y la cianobacteria *Anabaena* sp. también han sido reportadas. El monitoreo de especies nocivas es esencial para prevenir intoxicaciones humanas y descubrir los riesgos que enfrentan los ecosistemas costeros del estado. Algunos autores han indicado que la frecuencia de FAN podría incrementarse en ciertas regiones del planeta, derivado de las variaciones de las temperaturas y los patrones climáticos afectados por el cambio climático. Ante este escenario, se hace evidente la necesidad de fortalecer los grupos de investigación dedicados al estudio de las especies formadoras de FAN. Esto no solo permitirá una mejor comprensión de los factores que desencadenan y regulan estos FAN, sino que también contribuirá al desarrollo de estrategias de monitoreo, prevención y mitigación.

Palabras clave: Campeche, eutrofización, fitoplancton nocivo, golfo de México, toxinas marinas.

Abstract

The accelerated growth of the human population in the coastal states of Mexico, which will reach 64 million in 2030, exerts a marked environmental pressure on coastal areas, where anthropogenic productive and recreational activities affect the ecological balance. Phytoplankton is highly susceptible to these alterations, mainly to the response of the increase in nutrients that is due to this accelerated growth of human populations, affecting the food web. In Mexico, harmful algal blooms (HAB) represent a serious environmental and public health problem, regulated by outdated regulations. In the coastal waters of the state of Campeche, with a coastline of 425 km, various efforts have been made to identify phytoplanktonic species known to form HAB. Diatoms of the genus *Pseudo-nitzschia*, and the thecate dinoflagellate *Pyrodinium bahamense* have been identified recurrently and, to a lesser extent, the naked dinoflagellate *Karenia brevis* and the cyanobacterium *Anabaena* sp. have also been reported. Monitoring harmful species is essential to prevent human poisoning and to discover the risks faced by the state's coastal ecosystems. Some authors have indicated that the frequency of HABs could increase in certain regions of the planet, due to variations in temperatures and weather patterns affected by climate change. Given this scenario, the need to strengthen research groups dedicated to the study of causing becomes evident. This will not only allow a better understanding of the factors that trigger and regulate these HABs, but will also contribute to the development of monitoring, prevention and mitigation strategies.

Keywords: harmful algae, Campeche, Gulf of Mexico, eutrophication, marine toxins.



Introducción

Una de las principales dificultades que enfrentan los 17 estados costeros de México es el acelerado crecimiento de la población humana. Según estimaciones del Consejo Nacional de Población para el año 2030 se espera que la población en estas zonas alcance los 64 millones de personas (Méndez *et al.*, 2022). Esto adquiere una relevancia particular en los 264 municipios costeros de México, de los cuales 150 tienen acceso directo a la playa (SEMAR, 2020). De acuerdo con las características demográficas y sociales, las zonas costeras son espacios donde se realizan actividades productivas y recreativas. Aunque la legislación mexicana incluye una amplia gama de normas y reglamentos para regular los vertidos de posibles contaminantes en estas áreas, su aplicación y cumplimiento pueden variar dependiendo de la zona y la actividad económica involucrada. Existen disposiciones específicas que establecen límites máximos permisibles de contaminantes, condiciones para el tratamiento de aguas residuales y procedimientos para la obtención de permisos de descarga. Un ejemplo de ello es la Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEMARNAT-2021, la cual regula las descargas de aguas residuales en cuerpos de agua nacionales con el objetivo de proteger su calidad y minimizar el impacto ambiental (DOF, 2016). Además, leyes como la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) establecen sanciones para quienes infrinjan las normativas ambientales y definen los principios de la política ambiental en el país (DOF, 2016). Por otro lado, la Ley de Vertimientos en las Zonas Marinas Mexicanas tiene el propósito de regular y controlar la contaminación en ecosistemas costeros y marinos, asegurando la protección de los recursos marítimos del país (DOF, 2020). Sin embargo, las autoridades a menudo se ven rebasadas por el incremento de actividades productivas que no pueden supervisar.

La zona de transición, o ecotono, en este caso, se refiere a la región ubicada entre la zona litoral, que corresponde a la parte cercana a la costa o al

borde del cuerpo acuático, y la zona continental, que abarca el área más alejada de la costa (Araujo-Leyva *et al.*, 2024). Se trata de un “límite difuso” donde ambos ecosistemas se encuentran y se entremezclan.

Los postulados ecológicos establecen que los ecotonos son de alta diversidad y están en constante cambio. Lo seguro es que estas zonas son de cierta forma un “campo de batalla” entre los organismos nativos y la invasión inexorable humana. No obstante, los ecotonos, generalmente, proveen un sinnúmero de servicios ecosistémicos de gran relevancia para todos los organismos (nativos o no) (Chen *et al.*, 2020). Un ejemplo de lo anterior, son los cuerpos de agua costeros, también conocidos como aguas de primer contacto (playas) desde una perspectiva antropocéntrica. En estos cuerpos de agua, los organismos fotoautótrofos (fitoplancton) son los responsables de transformar la energía lumínica y el dióxido de carbono en glucosa, una molécula orgánica esencial para su crecimiento y funcionamiento (Falkowski y Raven, 2007).

En ocasiones el fitoplancton es definido como “organismos errantes”; no obstante, su papel va más allá de simplemente vagar por el agua. Entre sus particularidades, se destaca su naturaleza microscópica, lo que incrementa su complejidad a la hora de estudiarlos y, en muchos casos, su subestimación. Además, el recurso humano dedicado a su estudio es escaso, y cada vez se reclutan menos jóvenes para investigar a este grupo de organismos tan veleidoso, debido a que para algunos no es tan carismático ni popular.

No obstante, el fitoplancton es el principal responsable de aproximadamente el 70 % de la fotosíntesis total del planeta, desempeñando un papel clave en la producción de oxígeno y en la regulación del carbono a nivel global (Pal y Choudhury, 2014). Además, al encontrarse en la base de la red trófica, constituye la principal fuente de energía para numerosos organismos acuáticos (D’Costa *et al.*, 2019). Su importancia ecológica también radica



en su uso como bioindicador, ya que su presencia y abundancia brindan información sobre el estado de conservación de los ecosistemas acuáticos y la calidad del agua (Vuorio *et al.*, 2007; Poot-Delgado y Okolodkov, 2014). En este sentido, el fitoplancton ha sido ampliamente utilizado para evaluar el estado ecológico de los cuerpos de agua, especialmente en el monitoreo de fenómenos como los FAN.¹

Los síndromes tóxicos más conocidos asociados con los FAN son PSP (intoxicación paralizante por consumo de mariscos), DSP (intoxicación diarrea por consumo de mariscos), ASP (intoxicación amnésica por consumo de mariscos), AZP (intoxicación por azaspiracidos por consumo de mariscos), NSP (intoxicación neurológica por consumo de mariscos) y CFP (intoxicación ciguatera por consumo de peces) (FAO, 2005).

Por lo tanto, los FAN constituyen un problema ambiental estrechamente vinculado a los procesos de eutrofización que, junto con el cambio climático, se consideran unos de los estresores ambientales más significativos para las especies de microalgas formadoras de FAN (Anderson *et al.*, 2011; Glibert, 2020). Desde hace 4 décadas se ha venido

reportando un el incremento de la concentración de nutrientes inorgánicos (en particular, de N y P) como uno de los factores principales del aumento de eventos de FAN en términos de su frecuencia, intensidad, duración y extensión geográfica (Anderson *et al.*, 1989; Smayda, 1990; Hallegraeff, 1993); sin embargo, se ha demostrado que este aumento no tiene una tendencia global (en gran medida, por la percepción humana), sino que existen tendencias regionales (Hallegraeff *et al.*, 2021). De cualquier forma, las principales causas de la eutrofización antropogénica de las aguas costeras y, como consecuencia, el aumento de eventos de FAN durante las últimas décadas se debe en parte al crecimiento de la población humana que conlleva a una mayor producción de alimento (agricultura, ganadería, acuicultura y pesquería), así como a la producción y consumo de energía (Glibert *et al.*, 2005; Anderson *et al.*, 2011). Además, entre las fuentes de nutrientes que estimulan el desarrollo de FAN están las aguas residuales, la deposición atmosférica y el flujo de aguas subterráneas (Anderson *et al.*, 2002).

Estudios de los FAN en México

En México, la atención de los FAN está regulada por diversas normas y políticas que buscan proteger la salud pública, los ecosistemas marinos y garantizar la seguridad alimentaria. Es la Comisión Federal para la Protección contra Riesgos Sanitarios (COFEPRIS), dentro de la Secretaría de Salud del gobierno de México, quien supervisa el monitoreo realizado por las autoridades sanitarias de los diversos estados de México en relación con

las emergencias de salud causadas por eventos de FAN (COFEPRIS, 2016a). Este monitoreo incluye la detección de toxinas, la implementación de vedas sanitarias y la ejecución de cierres precautorios (COFEPRIS, 2016b, 2017); no obstante, se basan en lineamientos de trabajo que se consideran desfasados o no acordes con las necesidades y dinámicas actuales (tabla 1).

¹Los Florecimientos Algaes Nocivos (FAN) son fenómenos naturales que se caracterizan por una acumulación de biomasa algal que puede tener un impacto negativo sobre la salud pública sobre organismos o actividades económicas (García-Mendoza *et al.*, 2016). Con base a la Comisión Internacional Oceanográfica de la UNESCO, el término FAN es un descriptor socioeconómico, pero no estrictamente científico porque se refiere a la percepción humana de la nocividad y la variedad de impactos negativos causados por microalgas -diatomeas, dinoflagelados, rafidofíceas, cianobacterias e incluso macroalgas (Kudela *et al.*, 2015).



Tabla 1. Normas y documentos de trabajos aplicables a los FAN de acuerdo con la normatividad mexicana.

| Documento | Campo de aplicación | Referencia |
|--|--|--|
| NOM-EM-005-SSA1-2001 | Establece las especificaciones sanitarias para reducir la exposición excesiva o innecesaria de la población a toxinas marinas y protegerla de intoxicaciones causadas por la presencia del fenómeno de marea roja en ostión, almeja, mejillón, escalopas, caracol y otros moluscos en sus diferentes variedades. | DOF (2001) |
| NOM-242-SSA1-2009 | Productos y servicios. Productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados. Especificaciones sanitarias y métodos de prueba. | DOF (2009) |
| Plan de contingencia para el control de biotoxinas marinas | Establece un sistema de alerta temprana de FAN, con el fin de aplicar medidas preventivas de manera oportuna, tendientes a evitar el consumo de moluscos bivalvos expuestos a mareas rojas tóxicas | COFEPRIS (2015) |
| Manual de buenas prácticas de producción acuícola de moluscos bivalvos para la inocuidad alimentaria | Presenta y describe las buenas prácticas de producción acuícola de moluscos bivalvos relacionadas con el manejo del agua, alimento, sustancias químicas y fármacos, juntamente con aspectos de inocuidad durante la cosecha. | Calvario-Martínez y Montoya-Rodríguez (2003) |
| Instrucción de trabajo para el control sanitario de los moluscos expuestos a FAN | Establece las acciones que habrán de aplicarse en el ámbito del control sanitario para evitar la exposición de la población a las biotoxinas marinas por el consumo de moluscos bivalvos (ostión, almeja, mejillón), así como de la clase Gastropoda (caracol) y algunas especies de pescados incluyendo límites, criterios, procedimientos uniformes y mecanismos de coordinación con los sectores públicos, social y privado ante la presencia de FAN. | COFEPRIS (2016a) |
| Guía técnica del programa mexicano de sanidad de moluscos bivalvos | Guía técnica para el adecuado cumplimiento de los requisitos del Programa Mexicano de Sanidad de Moluscos Bivalvos (PMSMB) utilizados para la clasificación de áreas de cosecha, registro o certificación de cosechadores y control y vigilancia sanitaria de las plantas de proceso, así como los requisitos para su distribución en los mercados de exportación. | COFEPRIS (2008) |
| Manual de laboratorio para el Programa Mexicano de Sanidad de Moluscos Bivalvos (PMSMB) | Documento que tiene por objetivo orientar a los laboratorios nacionales el cumplimiento de los requisitos técnicos analíticos del PMSMB, incluyendo los requisitos del National Shellfish Sanitation Program (NSSP). | COFEPRIS (2024) |

Un ejemplo de esto es el lineamiento para el muestreo de fitoplancton y detección de biotoxinas marinas (COFEPRIS, 2016a), que solo abarca un número limitado de especies, incluyendo 14 dinoflagelados y un género de diatomeas (*Pseudo-nitzschia*), y no contempla las cianobacterias (tabla 2). Además, asume la similitud de las aguas costeras del Pacífico, el golfo de México y el mar Caribe, cuando las condiciones y características son distintas.

Otra consideración relevante es la vigilancia de la inocuidad alimentaria que se enfoca en la cadena productiva de alimentos bajo la responsabilidad del

Servicio Nacional de Sanidad, Inocuidad y Calidad Agroalimentaria (SENASICA) (SADER, 2020). Sin embargo, la inocuidad puede verse comprometida cuando se trata de productos de extracción, que a menudo carecen de una supervisión sanitaria directa, lo que aumenta el riesgo de intoxicaciones humanas debido a toxinas marinas producidas por las especies causantes de FAN (FAO, 2005).

Aunque la clasificación internacional de enfermedades incluye a la “ciguatera” (una intoxicación por consumo de pescado contaminado con ciguatoxinas, síndrome que también es conocido como CFP por sus siglas en inglés (ciguatera fish poison-



Tabla 2. Límites máximos permisibles de fitoplancton potencialmente tóxico en agua de mar (modificado de COFEPRIS, 2016a).

| Especies fitoplanctónicas | Síndrome | Límites (células L ⁻¹) |
|------------------------------|----------|------------------------------------|
| <i>Alexandrium</i> spp. | | 1,000 |
| <i>Pyrodinium bahamense</i> | PSP | 5,000 |
| <i>Gymnodinium catenatum</i> | | 5,000 |
| <i>Dinophysis</i> spp. | | 200 |
| <i>Prorocentrum lima</i> | DSP | |
| <i>Prorocentrum concavum</i> | | 200 |
| <i>Pseudo-nitzschia</i> spp. | ASP | 50,000 |
| <i>Karenia brevis</i> | NSP | 5,000 |

Siglas en inglés: PSP (paralytic shellfish poisoning), DSP (diarrheic shellfish poisoning), ASP (amnesic shellfish poisoning), NSP (neurotoxic shellfish poisoning)

ning) y el “escombrotismo” también conocido como “escombroidosis” o intoxicación por histaminas, compuestos producidos por bacterias, debido a una mala conservación de los productos marinos) (OPS, 2003), esta no está contemplada en la norma mexicana NOM-017-SSA2-2012 (DOF, 2013), ni en los manuales de vigilancia epidemiológica de México. Sin embargo, sí está considerado en la instrucción de trabajo para el muestreo de fitoplancton y detección de biotoxinas marinas (COFEPRIS, 2005; DOF, 2009; tabla 3). La intoxicación por ciguatera tiene su origen en la producción de ciguatoxinas (potentes neurotoxinas de tipo políeter, que al igual que las brevetoxinas son solubles en lípidos) por dinoflagelados bentónicos de los géneros *Gambierdiscus* R. Adachi et Y. Fuku-

yo y *Fukuyoa* D.X. Qui, R.M. Lopes et Senjie Lin.

Adicional a la normatividad disponible, relacionada con la problemática de los FAN, con la que se cuenta en el país, es recomendable que esta sea revisada con más regularidad, para su actualización con base a los avances en el conocimiento científico-técnico para su estudio. En situaciones de emergencia, de acuerdo con la Ley General de Salud, la gestión de las contingencias sanitarias está respaldada por el Título Décimo, relativo a la acción extraordinaria en materia de salubridad general. En su capítulo único, los artículos 181 al 184 facultan a la Secretaría de Salud para dictar las medidas inmediatas y necesarias con el fin de prevenir y controlar los riesgos para la salud (DOF, 2024).



Tabla 3. Límites máximos permitidos de toxinas marinas en productos marinos provenientes de áreas de cultivos y de zonas de extracción (modificado de COFEPRIS, 2005; DOF, 2009).

| Toxinas marinas | Síndrome | Límites (células L ⁻¹) |
|--|----------|--|
| Saxitoxina (toxinas paralizantes) | PSP | 800 µg equivalentes de saxitoxina por kg |
| Ácido okadaico y análogos (toxinas diarreas) | DSP | 160 µg equivalentes de ácido okadaico por kg |
| Ácido domóico (toxinas amnésicas) | ASP | 20 mg de ácido domóico por kg |
| Brevetoxina (toxina neurotóxica) | NSP | 20 UR/100 g |
| Yesotoxinas | YTX | 1 mg de yesotoxinas por kg |
| Azaspirácidos | AZP | 160 µg de azaspirácidos por kg |
| Ciguatoxina | CFP | 2.5 UR por 100 g |

UR (unidades ratón: concentración suficiente de toxina vía intraperitoneal (IP) para causar la muerte de un ratón de 20 g en 24 horas).

Estudio del fitoplancton nocivo en las costas de Campeche

El estado de Campeche se encuentra en el sureste del golfo de México y forma parte de los cinco estados costeros mexicanos del golfo de México. Cuenta con un litoral de 425 km de extensión, lo que representa el 3.8 % del total de litoral mexicano. A nivel nacional, ocupa el cuarto lugar en producción y el quinto en valor de la producción pesquera y acuícola (CONAPESCA, 2022). Sin embargo, sus costas han sido diagnosticadas como eutróficas (Alpuche-Gual, 2014; Poot-Delgado *et al.*, 2022).

El litoral de la costa norte del estado está conformado por una extensa franja de manglares. Hacia el sur, en el litoral de los municipios de Campeche y el norte de Champotón, la costa es árida (colinas boscosas con salientes y ensenadas), en tanto que en los municipios de Champotón y Carmen se forma una extensa franja arenosa, que cuenta con playas de gran importancia, donde anidan varias especies de tortugas marinas. La isla del Carmen está separada por la laguna de Términos que forma parte del Área de Protección de Flora y Fauna de la Laguna de Términos (APFFLT) con una superficie de 705,016 Ha (INE-SEMARNAP, 1997).

El área se caracteriza por presentar tres temporadas climáticas: temporada de secas de febrero a mayo (el periodo con baja precipitación atmosférica), temporada de lluvias de junio a septiembre y temporada de nortes (vientos predominantes del

norte) de octubre a enero (Ramos-Miranda *et al.*, 2006).

Uno de los primeros trabajos que rescata históricamente la presencia de especies de fitoplancton potencialmente nocivas en el Banco de Campeche, golfo de México, es la revisión realizada por Okolodkov (2003) sobre los reportes de investigaciones ruso-cubanas llevadas a cabo entre 1962 y 1980. En esta revisión se reportaron FAN de dinoflagelados planctónicos, en las cuales se observó y registró una coloración del agua de mar causada por el dinoflagelado *Scrippsiella acuminata* (Ehrenberg) Kretschmann, Elbrächter, Zinssmeister, S. Soehner, Kirsch, Kusber et Gottschling (= *Scrippsiella trochoidea* (F. Stein) A.R. Loeblich), posiblemente, anteriormente reportado como *Gonyaulax minima* Matzenauer (Zernova, 1970, 1982). Otro evento fue causado por el dinoflagelado tóxico *Karenia brevis* (C.C.Davis) Gert Hansen et Moestrup, reportado previamente como *Gymnodinium breve* C.C. Davis (Roujiyaynen *et al.*, 1968; Okolodkov, 2003). Santoyo y Signoret (1976) reportaron una alta abundancia de la diatomea planctónica *Thalassiothrix frauenfeldii* (Grunow) Grunow. Licea-Duran y Santoyo-Reyes (1990) registraron la presencia de otra diatomea, *Hemiaulus sinensis* Greville, en ambos casos en la zona central de la bahía de Campeche.



La Comisión para la Protección contra Riesgos Sanitarios del Estado de Campeche (COPRIS-CAM) desde 2003 se integró al Proyecto Nacional de Marea Roja bajo la coordinación de la COFEPRIS, realizando monitoreos a lo largo del litoral campechano, con 21 puntos de muestreo (Del Ángel-Tafoya, 2013). Sin embargo, los informes generados se limitan a documentos internos que contienen información sobre las especies dominantes de fitoplancton. Estos informes, a pesar de su limitada distribución son de gran utilidad, ya que han sido una de las principales fuentes de información sobre los registros de especies formadoras de FAN regional. Debido a los recurrentes FAN de *Karenia brevis* productor de brevetoxinas (neurotoxinas politer, solubles en lípidos) en el gofo de México, que han provocado impactos severos socioambientales, esta especie se convirtió en el principal objetivo de detección y monitoreo de las autoridades sanitarias en los estados costeros del golfo de México, tanto de la parte mexicana a través de COFEPRIS, como de la parte estadounidense a través de la Agencia de la Protección de Medio Ambiente de los EE.UU. (US EPA – U. S. Environmental Protection Agency) además de algunas universidades (Soto-Ramos *et al.*, 2012; Núñez-Vázquez *et al.*, 2016).

Aunado a estos esfuerzos, a partir de 2009 se inició el monitoreo del fitoplancton en las aguas de la bahía de Campeche, incrementando gradualmente los puntos de muestreo en toda la zona central costera del estado hasta llegar a la prospección de toxinas marinas presentes en peces de importancia socioeconómica. En un primer ejercicio, se recolectó información sobre el fitoplancton marino en las aguas costeras de Campeche, lo que permitió identificar no solo a *K. brevis*, sino también a otras especies asociadas al fitoplancton nocivo (Aké-Castillo y Poot-Delgado, 2014).

Durante el periodo de 2005 a 2022, se han registrado 46 eventos, destacando las diatomeas planctónicas del género *Pseudo-nitzschia* como la más frecuente durante la temporada de lluvias (junio-septiembre), con una amplia distribución a

lo largo del litoral de Campeche. Le sigue el dinoflagelado planctónico *Pyrodinium bahamense* L. Plate, que ha mostrado una distribución extendida y presencia tanto en la temporada de secas, como en la de lluvias. También se encontraron otros dinoflagelados planctónicos potencialmente nocivos como *Gymnodinium catenatum* H.W. Graham, *Karenia* cf. *mikimotoi* (Miyake et Kominami ex Oda) Gert Hansen et Moestrup, *Prorocentrum mexicanum* Osorio-Tafall y *P. cordatum* (Ostenfeld) J.D. Dodge (= *P. minimum* (Pavillard) J. Schiller). La cianobacteria *Anabaena* sp. ha estado presente en todo el litoral de Campeche, desde la bahía de Campeche hasta los bancos ostrícolas localizados en la Laguna de Términos (tabla 4).

La presencia de estas especies que son capaces de producir las diversas toxinas marinas se encontró en bajas concentraciones, fluctuando entre 10^2 y 10^5 células L^{-1} . Sin embargo, Núñez-Vázquez *et al.* (2022) demostraron la presencia de dos toxinas paralizantes más potentes (saxitoxina y neosaxitoxina) en células obtenidas durante proliferaciones de *P. bahamense* en el litoral de Campeche, similares a las observadas en aislados silvestres de esta especie o en cepas cultivadas de otras regiones del mundo, aunado a la detección previa de toxinas paralizantes en peces globo de la misma región, también se han detectado ciguatoxinas, tetrodotoxinas y ácido domóico en peces recolectados en la costa de Campeche.

Como resultado de lo anterior, se han publicado estudios que subrayan la necesidad urgente de actualizar la norma nacional que establece los criterios de clasificación de la calidad de las playas, NMX-AA-120-SCFI-2016 (DOF, 2016), así como la NOM-017-SSA2-2012 (DOF, 2013). Esta última no contempla el registro de síndromes de intoxicación humana como, por ejemplo, la ciguatera y el escombrotismo, asociados al consumo de pescado, ni el efecto tóxico de otros alimentos marinos u otras vías de exposición, como en el caso de las cianotoxinas y aquellos no especificados (OPS, 2003; Poot-Delgado *et al.*, 2024).



Tabla 4. Abundancias máximas (células L⁻¹) de algunas especies fitoplanctónicas reportadas como potencialmente nocivas a lo largo de la costa del estado de Campeche, sureste del golfo de México (2005-2022).

| Especie | Toxinas asociadas | Localidad | Fecha | Abundancia máxima (cél. L ⁻¹) | Referencias |
|---|--|---|----------|---|-------------------------------------|
| <i>Pseudo-nitzschia</i> sp.(a) | Amnésicas | Isla Arena, Calkiní | dic-2005 | 30,000 | |
| | | Costa Villamar, Champotón | mar-2005 | 30,000 | |
| <i>Pyrodinium bahamense</i> (b) | Paralizantes | Malecón de Campeche | ago-2005 | 330,000 | *COPRISCAM, LESP** |
| | | Malecón de Campeche | ago-2005 | 315,000 | |
| <i>Anabaena</i> sp.(c). | Cianotoxinas (MCs, ATXs, PST, LPP y CYN) † | Bahía de Campeche | dic-2007 | 323,000 | Poot-Delgado (2016) |
| <i>Pyrodinium bahamense</i> (b) | Paralizantes | Bahía de Campeche | abr-2008 | 80,000 | |
| <i>Pseudo-nitzschia</i> sp.(a) | Amnésicas | Región norte litoral (costa de Calkiní-Hecelchakán) | jun-2008 | 450,000 | *COPRISCAM, LESP** |
| <i>Pseudo-nitzschia</i> sp.(a) | Amnésicas | Bahía de Campeche | dic-2008 | 64,000 | Poot-Delgado (2016) |
| <i>Pyrodinium bahamense</i> (b) | Paralizantes | Región centro litoral (costa de Campeche-Champotón) | sep-2009 | 20,000 | *COPRISCAM, LESP** |
| <i>Pseudo-nitzschia delicatissima</i> (a) | Amnésicas | Región centro litoral (costa de Campeche-Champotón) | sep-2009 | 76,000 | *COPRISCAM, LESP** |
| <i>Anabaena</i> sp.(c) | Cianotoxinas (MCs, ATXs, PST, LPP y CYN) † | Litoral de Champotón | feb-2010 | 100,000 | Poot-Delgado (2016) |
| <i>Pyrodinium bahamense</i> (b) | Paralizantes | Litoral de Champotón | jul-2010 | 311,000 | |
| <i>Karenia brevis</i> (b) | Brevetoxinas | Región norte litoral (Calkiní, Hecelchakán, Tenabo, Campeche y Champotón) | sep-2011 | 3,992,000 | *COPRISCAM, LESP** |
| <i>Pseudo-nitzschia</i> spp(a) | Amnésicas | Región norte litoral (Calkiní, Hecelchakán, Tenabo, Campeche y Champotón) | sep-2011 | 50,000 | *COPRISCAM, LESP** |
| <i>Karenia brevis</i> (b) | Brevetoxinas | Banco de Campeche | sep-2012 | 3,000,000 | Soto-Ramos (2013) |
| <i>Pseudo-nitzschia</i> sp.(a) | Amnésicas | Banco ostrícola (Laguna de Términos) | ene-2013 | 640,000 | Poot-Delgado (2018) |
| <i>Anabaena</i> sp.(c) | Cianotoxinas (MCs, ATXs, PST, LPP y CYN) † | Banco ostrícola (Laguna de Términos) | may-2013 | 660,000 | Poot-Delgado et al (2018) |
| <i>Pseudo-nitzschia</i> spp(a) | Amnésicas | Costa central de Campeche | jun-2017 | 37,000 | Poot-Delgado (2018) |
| | | Banco ostrícola (Laguna de Términos) | sep-2018 | 6,000 | *COPRISCAM, LESP** |
| <i>Anabaena</i> sp.(c) | Cianotoxinas (MCs, ATXs, PST, LPP y CYN) † | Payucan | abr-2019 | 35,000 | Poot-Delgado y Pérez-Morales (2023) |
| <i>Pseudo-nitzschia</i> spp (a) | Amnésicas | Payucan, Seybaplaya | may-2019 | 55,000 | Poot-Delgado y Pérez-Morales (2023) |
| <i>Pyrodinium bahamense</i> (b) | Paralizantes | Boca del Rio, Champotón | may-2019 | 200,000 | Poot-Delgado et al. (2023) |
| | | Tecnológico, Champotón | may-2022 | 1,200,000 | |

(a)Diatomeas; (b)Dinoflagelados; (c)Cianobacterias; †MCS: Microcistinas, ATXs: Anatoxinas, PST: Paralizantes, LPP: Lipopolisacáridos y CYN: Cylindrospermosinas

*Comisión para la Protección y Riesgo Sanitario del estado de Campeche (COPRISCAM).

**Laboratorio Estatal de Salud Pública del Estado de Campeche (LESP).



Perspectivas

A pesar de los avances logrados, aún existen numerosos desafíos y áreas de investigación que deben ser abordados. Entre ellos, el cambio climático que está alterando las condiciones oceánicas y costeras, lo que podría afectar la distribución y proliferación del fitoplancton nocivo. Es crucial investigar cómo estos cambios influirán en la frecuencia e intensidad de los eventos de FAN en Campeche. La proliferación de este tipo de fitoplancton puede tener fuertes impactos en las industrias pesqueras, acuícolas y turística, por lo que es necesario desarrollar estrategias para mitigar estos efectos y proteger los medios de vida de las comunidades costeras que dependen de estos recursos. Además, incrementar la conciencia sobre los riesgos asociados con

el fitoplancton nocivo y fomentar la educación en las comunidades locales resulta esencial para una gestión efectiva de los eventos de FAN. Los programas educativos y de divulgación pueden ayudar a las comunidades a responder de manera más eficiente y a adoptar prácticas que reduzcan el riesgo de exposición. Por último, dado que el fitoplancton nocivo “no respeta fronteras”, es fundamental fortalecer la cooperación regional e internacional en materia de monitoreo e investigación de FAN. Compartir datos, estrategias de estudio y buenas prácticas de manejo de FAN con otros países y regiones afectadas puede mejorar la capacidad global para enfrentar los desafíos que plantea el fitoplancton nocivo.

Conclusión

El estudio del fitoplancton nocivo en la costa central del estado de Campeche ha avanzado significativamente en las últimas décadas, proporcionando conocimientos cruciales para gestionar y mitigar sus impactos. Sin embargo, la investigación continúa siendo una prioridad para enfrentar los desafíos emergentes, especialmente, en un contexto

de cambio climático y creciente presión sobre los recursos naturales marinos. A medida que se desarrollan nuevas estrategias y tecnologías, la colaboración entre científicos, gestores y comunidades locales será fundamental para proteger la salud de los ecosistemas costeros.

Agradecimientos

Se agradece el apoyo financiero brindado por COSDAC-SEP y TECNM. CAPD agradece la beca posdoctoral otorgada por SECIHTI (Estancias

posdoctorales por México 2022). Los evaluadores anónimos amablemente mejoraron el manuscrito.



Referencias

- Aké-Castillo, J.A., y C.A. Poot-Delgado. 2016. FAN en el golfo de México: panorama general sobre eventos y especies. 298-307. En: García-Mendoza, E., S.J. Quijano-Scheggia, A. Olivos-Ortiz y E.J. Núñez-Vázquez (Eds.). Florecimientos Algaes Nocivos en México. Editorial CICESE, Ensenada, Baja California, México.
- Alpuche-Gual, L. (Coord.). 2014. Clasificación de playas campechanas para su manejo integral y desarrollo sostenible. Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, Campeche, México.
- Anderson, D.M. 1989. Toxic algal blooms and red tides: A global perspective. 11-16. En: Okaichi, T., D.M. Anderson y T. Nemoto (Eds.). Red Tides: Biology, Environmental Science and Toxicology. Elsevier, New York, U.S.A.
- Anderson, D.M., P.M. Glibert y J.M. Burkholder. 2002. Harmful algal blooms and eutrophication: Nutrient sources, composition, and consequences. *Estuaries and Coasts*, 25: 704-726. DOI:10.1007/BF02804901
- Anderson, D.M., A.D. Cembella y G.M. Hallegraeff. 2011. Progress in understanding harmful algal blooms: Paradigm shifts and new technologies for research, monitoring, and management. *Annual Review of Marine Science*, 4: 143-176. DOI:10.1146/annurev-marine-120308-081121
- Araujo-Leyva, O., J. Lorda-Solórzano, M.A. Moriel Sáenz, S. Ruiz Mejía, A. González-Rojas y L.T. Durazo Sandoval. 2024. La vida en la zona intermareal: adaptaciones en un ecosistema cambiante. *Biología y Sociedad*, 7(13): 48-62. DOI:10.29105/bys7.13-105
- Calvario-Martínez, O. y L. Montoya-Rodríguez. 2003. Manual de buenas prácticas de producción acuícola de moluscos bivalvos para la industria alimentaria. Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C., Mazatlán, Sinaloa, México.
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. 2020. Ley de Vertimientos en las Zonas Marinas Mexicanas. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LVZ-MM_130420.pdf
- Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. 2021. Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/ref/lgepa.htm>
- COFEPRIS. 2005. Instrucción de trabajo para el muestreo de fitoplancton y detección de biotoxinas marinas. Secretaría de Salud, México, D.F., México. <https://www.gob.mx/cofepris/documentos/lineamiento-de-trabajo-para-el-muestreo-de-fitoplancton-y-deteccion-de-biotoxinas-marinas>
- COFEPRIS. 2008. Guía técnica para el control sanitario de moluscos bivalvos. Programa mexicano de sanidad de moluscos bivalvos. Secretaría de Salud, México, D.F., México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/708097/COS-DEPE-P-01-GI-01__1_.pdf
- COFEPRIS. 2015. Plan de contingencia para el control de biotoxinas marinas. Secretaría de Salud, México, D.F., México. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/178793/Plan_de_contingencia_MB_ES_20151208_ESP.pdf
- COFEPRIS. 2016a. Lineamientos del Proyecto del Marea Roja. Secretaría de Salud, México, D.F., México. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/lineamientos-del-proyecto-del-marea-roja>
- COFEPRIS. 2016b. Antecedentes de Presencia de Marea Roja en Costas Nacionales. México, D.F., México. <https://www.gob.mx/cofepris/documentos/presencia-de-marea-roja-en-costas-nacionales-durante-2003>
- COFEPRIS. 2017. Emergencias Sanitarias por Presencia de Marea Roja (Florecimientos Algaes Nocivos y Toxinas). Vedas Sanitarias y Cierres Precautorios. Secretaría de Salud, México, D.F., México. <https://www.gob.mx/cofepris/acciones-y-programas/emergencias-sanitarias-estatales-por-marea-roja>
- COFEPRIS. 2024. Manual de Laboratorio para el Programa Mexicano de Sanidad de Moluscos Bivalvos. Secretaría de Salud, México, D.F., México. <https://www.gob.mx/cofepris/documentos/manual-de-laboratorios-del-pmsmsb>
- CONAPESCA. 2022. Anuario Estadístico de Acuicultura y Pesca. Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca, Mazatlán, Sinaloa, México. https://nube.conapesca.gob.mx/sites/cona/dgppe/2022/ANUARIO_ESTADISTICO_DE_ACUACULTURA_Y_PESCA_2022.pdf
- Chen, X.C., Y.Y. Huang, H.L. Yang, L.P. Pan, C.P. Danielle, P. Xu, J. Tang, W. You, X. He, Q. Wen. 2020. Restoring wetlands outside of the seawalls and to provide clean water habitat. *Science of The Total Environment*, 721:137788. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137788
- D'Costa, P.M. y R.K. Naik. 2019. Advances in sampling strategies and analysis of phytoplankton. 501-521. In: Meena S.N. y M.M. Naik (Eds.). Advances in Biological Science Research: A practical Approach. Academic Press. DOI:10.1016/b978-0-12-817497-5.00031-8
- Del Ángel-Tafoya, F. 2013. 10 años de monitoreo en la atención de florecimiento algal en el estado de Campeche. Reunión de responsables nacionales y estatales de los temas de moluscos bivalvos y marea roja. Comisión de Operación Sanitaria, Dirección Ejecutiva de Programas Especiales, Ensenada, Baja California, México, del 8 al 12 de julio de 2013.
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2001. NOM-EM-005-SSA1-2001. Salud ambiental. Especificaciones sanitarias para el control de los moluscos bivalvos y otros moluscos expuestos a la marea roja. Criterios para proteger la salud de la población. 24 de diciembre de 2001. <http://legismex.mty.itesm.mx/normas/ssa1/ssa1005em-01.pdf>
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2009. NOM-242-SSA1-2009. Productos y servicios. Productos de la pesca frescos, refrigerados, congelados y procesados. Especifica-



- ciones sanitarias y métodos de prueba. <https://www.dof.gob.mx/normasOficiales/4295/salud2a/salud2a.htm>
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2013. NOM-017-SSA2-2012. Para la vigilancia epidemiológica. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5288225&fecha=19/02/2013#gsc.tab=0
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2016a. NMX-AA-120-SCFI-2016. Que establece los requisitos y especificaciones de sustentabilidad de calidad de playas. <http://www.economia-nmx.gob.mx/normas/nmx/2010/nmx-aa-120-scfi-2016.pdf>
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2016b. Ley general del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGEEPA.pdf>
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2020. Ley de vertimientos en las zonas marinas mexicanas. https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LVZMM_130420.pdf
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2022. NOM-001-SEMARNAT-2021. Que establece los límites permisibles de contaminantes en descargas de aguas residuales en cuerpos receptores de propiedad nacional. https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5645374&fecha=11%2F03%2F2022
- DOF (Diario Oficial de la Federación). 2024. Ley general de salud. <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/LGS.pdf>
- Falkowski, P. G. y J.A. Raven. 2007. Aquatic Photosynthesis. Second Edition. Princeton University Press, Princeton, NJ.
- FAO. 2005. Biotoxinas marinas. Estudio FAO: Alimentación y Nutrición. FAO. Roma, Italia.
- García-Mendoza, E., S.I. Quijano-Scheggia, A. Olivos-Ortiz, y E.J. Núñez-Vázquez. 2016. Florecimientos Algas Nocivos en México. Ensenada, México. CICESE.
- Glibert, P.M. 2020. Harmful algae at the complex nexus of eutrophication and climate change, *Harmful Algae*, 91: 101583. DOI:10.1016/j.hal.2019.03.001
- Glibert, P.M., S. Seitzinger, C.A. Heil, J.M. Burkholder, M.W. Parrow, L.A. Codispoti y V. Kelly. 2005. The role of eutrophication in the global proliferation of harmful algal blooms: New perspectives and approaches. *Oceanography*, 18(2): 198-209. DOI:10.5670/oceanog.2005.54
- Hallegraeff, G.M. 1993. A review of harmful algal blooms and their apparent global increase. *Phycologia*, 32(2): 79-99.
- Hallegraeff, G.M., D.M. Anderson, C. Belin, M.Y. Dechraoui Bottein, E. Bresnan, M. Chinain, H. Enevoldsen, M. Iwataki, B. Karlton, C.H. McKenzie, I. Sunesen, G.C. Pitcher, P. Provoost, A. Richardson, L. Schweibold, P.A. Tester, V.L. Trainer, A.T. Yñiguez y A. Zingone. 2021. Perceived global increase in algal blooms is attributable to intensified monitoring and emerging bloom impacts. *Communications Earth & Environment*, 2:117. DOI:10.1038/s43247-021-00178-8
- INE-SEMARNAT. 1997. Programa de manejo del área de protección de flora y fauna Laguna de Términos. Instituto Nacional de Ecología. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Primera edición. México D.F. <https://paot.org.mx/centro/ine-semarnat/anp/AN19.pdf>
- IOC-UNESCO. 2002. IOC-UNESCO Taxonomic Reference List of Harmful Micro Algae. Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO, Paris. <http://www.marinespecies.org/hab/>
- Kudela, R.M., E. Berdalet, S. Bernard, M. Burford, L. Fernandez, S. Lu, S. Roy, P. Tester, G. Usup, R. Magnien, D.M. Anderson, A. Cembella, M. Chinain, G. Hallegraeff, B. Reguera, A. Zingone, A. Enevoldsen, and E. Urban (eds.) 2015. Harmful Algal Blooms: A scientific summary for policy makers. IOC/UNESCO. Paris (IOC/INF-1320).
- Landsberg, J.H. 2002. The effects of harmful algal blooms on aquatic organisms. *Reviews in Fisheries Science*, 10(2): 113-390. DOI:10-1080/20026491051695
- Licea-Durán, S. y H. Santoyo-Reyes. 1991. Algunas características ecológicas del fitoplancton de la región central de la bahía de Campeche. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología*, 18(2): 157-167.
- Méndez, M.L., E.N. Sánchez y D.H. Segura. 2022. Gestión costera. Notas, Publicación bimestral de divulgación externa 199: artículo 2. <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=566&IdBoletin=200>
- Núñez-Vázquez, E.J., C. Ramírez-Camarena, C.A. Poot-Delgado, A. Almazán-Becerril, J.A. Aké-Castillo, A. Pérez-Morales, F.E. Hernández-Sandoval, L.J. Fernández-Herrera, A. Heredia-Tapia, C.J. Band-Schmidt, J.J. Bustillos-Guzmán, D.J. López-Cortés, G. Domínguez-Solís, T.C. Ley-Martínez, Y.R. Cauich-Sánchez, y L.A. Barra-González, 2016. Toxinas marinas en el golfo de México: orígenes e impactos. 308-321. En: García-Mendoza, E., S.I. Quijano-Scheggia, A. Olivos-Ortiz y E.J. Núñez-Vázquez (Eds.). Florecimientos Algas Nocivos en México. CICESE, Ensenada, México.
- Núñez-Vázquez, E.J., C.A. Poot-Delgado, A.D. Turner, F.E. Hernández-Sandoval, Y.B. Okolodkov, L.J. Fernández-Herrera, J.J. Bustillos-Guzmán. 2022. Paralytic shellfish toxins of *Pyrodinium bahamense* (Dinophyceae) in the southeastern Gulf of Mexico. *Toxins*, 14(11):760. DOI: 10.3390/toxins14110760
- Okolodkov, Y.B. 2003. A review of Russian plankton research in the Gulf of Mexico and the Caribbean Sea in the 1960-1980s. *Hidrobiológica*, 13(1): 207-221.
- OPS (Organización Panamericana de la Salud). 2003. Clasificación estadística internacional de enfermedades y problemas relacionados con la salud. 10a revisión. Organización Panamericana de la Salud. Washington, D.C. <https://ais.paho.org/classifications/chapters/pdf/volume1.pdf>
- Pal, R. y A.K. Choudhury. 2014. An Introduction to Phytoplanktons: Diversity and Ecology. New Delhi: Springer India. 175 pp.
- Poot-Delgado, C.A. 2016. Florecimientos algales nocivos en las costas de Campeche, golfo de México. *Investigación y Ciencia*, 68:91-96. DOI:10.33064/iycuaa2016682264
- Poot-Delgado, C.A. y A. Pérez-Morales. 2023. Spatiotemporal variation of harmful phytoplankton in recreational bea-



- ches in Campeche, southeastern Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas*, 49:e3389. DOI:10.7773/cm.y2023.3389.
- Poot-Delgado, C.A. y Y.B. Okolodkov. 2014. Microalgae as water quality indicators: An overview. 41-65. In: Snyder, M. (Ed.). *Aquatic Ecosystems Influences, Interactions and Impact on the Environment*. Nova Science Publishers, Inc.: Hauppauge, NY, USA.
- Poot-Delgado, C.A., E.J. Núñez-Vázquez, J. Rendon-von Ostén, J.I., López-Ruiz y W. Sosa-González. 2024. Intoxicaciones humanas por consumo de productos marinos en la población costera de Campeche, sureste del golfo de México. *Ciencias Pesqueras*, 32(1): 17-23.
- Poot-Delgado, C.A., J. Rendon-von Ostén, J.I. López-Ruiz y Y.B. Okolodkov. 2023. A bloom of *Pyrodinium bahamense* in the port operations of a seafood processing plant, SE Gulf of Mexico. *Harmful Algae News*, 72: 5. DOI:10.5281/zenodo.7937597
- Poot-Delgado, C.A., Y.B. Okolodkov, J.A. Aké-Castillo y J. Rendon-von Ostén. 2018. Potentially harmful cyanobacteria in oyster banks of Términos lagoon, southeastern Gulf of Mexico. *Acta Biológica Colombiana*, 23(1): 51-58. DOI: 10.15446/abc.v23n1.65809
- Poot-Delgado, C.A., Y.B. Okolodkov y J. Rendon-von Ostén. 2022. Spatio-temporal variation of harmful planktonic microalgae and cyanobacteria along the central coast of Campeche, southeastern Gulf of Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 108: 15-23. DOI:10.1007/s00128-021-03203-w
- Ramos-Miranda, J., D. Flores-Hernández, L.A. Ayala-Pérez, J. Rendon-von Ostén, G. Villalobos-Zapata y A. Sosa-López. 2006. Atlas Hidrológico e Ictiológico de la Laguna de Términos. Universidad Autónoma de Campeche, Campeche, México. <http://etzna.uacam.mx/epomex/pdf/bAtlas%20Hidrologico%20e%20Ictiologico.pdf>
- Roujyaynen, M.I., L.V. Georgieva y L.G. Senichkina. 1968. Composition, quantitative development and distribution of phytoplankton in the Central-American seas. 14-39. En: *Studies on the Central-American seas*, 2. Kiev, USSR.
- SADER (Secretaria de Agricultura y Desarrollo Rural). 2020. Inocuidad alimentaria en México. <https://www.gob.mx/agricultura/articulos/inocuidad-alimentaria-en-mexico>
- Santoyo, H. y M. Signoret. 1976. Variación nictemeral del fitoplancton en la Bahía de Campeche, México. *Revista Latinoamericana de Microbiología* (3): 161-167.
- Sar, E.A., M.E. Ferrario y B. Reguera. (Eds.). 2002. *Floraciones Algales Nocivas en el Cono Sur Americano*. Instituto Español de Oceanografía, España.
- SEMAR (Secretaría de Marina-Armada de México). 2020. México y el mar: relevancia del poder marítimo nacional. Instituto de Investigaciones Estratégicas de la Armada de México. Primera edición. Ciudad de México.
- Smayda, T.J. 1990. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: Evidence for a global epidemic. 29-40. En: Granéli, E., B. Sundström, L. Edler y D.M. Anderson (Eds.). *Toxic marine phytoplankton*. Elsevier, New York, U.S.A.
- Soto, I., Ch. Hu, K. Steidinger, F. Muller-Karger, J. Cannizzaro, J. Wolny, S. Cerdeira-Estrada, E. Santamaria-del Ángel, F. Tafoya-del Ángel, P. Álvarez-Torres, J. Herrera-Silveira y J. Allen. 2012. Binational collaboration to study Gulf of Mexico's harmful algae. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 93(5): 49-50.
- Vuorio, K., L. Lepistö y A.L. Holopainen. 2007. Intercalibrations of freshwater phytoplankton analyses. *Boreal Environment Research*, 12: 561-569.
- Zernova, V.V. 1970. On changes in colour of water in the Gulf of Mexico produced by planktonic algae. *Oceanological Studies* (USSR), 20: 105-109.
- Zernova, V.V. 1982. On the dependence of the quantitative development of phytoplankton on the abiotic factors in the Gulf of Mexico. *Proceedings of the Institute of Oceanology*, USSR Academy of Sciences, 114: 60-72.



Ruiz Villegas, M.E., Chávez Mata, P.E., Mata Sotres J.A., Monroy Dosta M. C. 2025. Presencia de *Diplostomum* en las cámaras oculares de peces de la zona estuarina de Chachalacas, Veracruz. JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático 7(1): 19-16. doi 10.26359/52462.0702



Presencia de *Diplostomum* en las cámaras oculares de peces de la zona estuarina de Chachalacas, Veracruz

Presence of *Diplostomum* in the eye chambers of fish from the estuarine zone of Chachalacas, Veracruz

Mitzi Elizabeth Ruiz Villegas¹, Paulina Estefanía Chávez Mata¹,
José Antonio Mata Sotres² y María del Carmen Monroy Dosta^{2*}

¹Licenciatura en Biología, Universidad Autónoma Metropolitana,
Unidad Xochimilco. CDMX, México.

²Laboratorio de Análisis Químico de Alimento Vivo, Departamento el Hombre y su Ambiente,
Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Xochimilco. CDMX, México.

* autor de correspondencia: mmonroy@correo.xoc.uam.mx

doi 10.26359/52462.0702

Recibido 04/noviembre/2024. Aceptado 20/abril/2025

JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático

Coordinación editorial de este número: Yassir E. Torres Rojas

Este es un artículo bajo licencia Creative Commons CC BY-NC-ND.



Resumen

Los trematodos *Diplostomum*, son de muy baja especificidad hospedatoria por lo que parasitan a una amplia variedad de peces dulceacuicolas de diversas especies, pero se requiere ampliar estudios en especies estuarinas debido a que su movilidad entre el ambiente dulce, salobre y marino que puede permitir que los parásitos encuentren mayor número de hospedadores entre los distintos ambientes por los que se desplazan. Por lo que el objetivo de este estudio fue determinar la presencia de *Diplostomum* en las cámaras oculares de peces colectados para consumo en la zona estuarina de Chachalacas, Veracruz. Del 2014 al 2024. Se colectaron 592 peces, de los cuales se examinaron las cavidades oculares para la detección de trematodos. De los peces colectados 376 fueron positivos al trematodo, donde se obtuvieron un total de 574 metacercarias, en diez especies de peces distintas. La lisa común (*Múgil cephalus*) presentó mayor incidencia parasitaria con 20.96 %, seguida del róbalo (*Centropomus undecimalis*) con 16.67 %. Es importante mencionar que también se identificó la presencia del parásito en el pez aguja del género *Belone*, especie marina con un solo reporte previo de afectación por *Diplostomum*.

Palabras clave: *Diplostomum*, metacercarias, peces, Chachalacas, Veracruz.

Abstract

The trematodes *Diplostomum* are of very low host specificity, so they parasitize a wide variety of freshwater fish of various species. However, it is necessary to expand studies in estuarine species because their mobility between fresh, brackish and marine environments can allow parasites to find a greater number of hosts between the different environments through which they move. Therefore, the objective of this study was to determine the presence of *Diplostomum* in fish collected for consumption in the estuarine zone of Chachalacas, Veracruz. From 2014 to 2024 a total of 592 fish were collected, of which the eye cavities were examined for the detection of trematodes. Of the fish collected, 376 were positive for the fluke, where a total of 574 metacercariae were obtained, in ten different species of fish. The common mullet (*Múgil cephalus*) had the highest parasitic incidence with 20.96%, followed by the sea bass (*Centropomus undecimalis*) with 16.67%. It is important to mention that the presence of the parasite was also identified in needlefish of the fish *Belone*, a marine species with only one previous report of involvement by *Diplostomum*.

Keywords: *Diplostomum*, metacercariae, fish, Chachalacas, Veracruz.



Introducción

La pesca representa un factor económico importante para el estado de Veracruz, no solo por la captura de especies marinas, sino también por la obtención de peces de agua dulce y salobre debido a la variedad de ríos que desembocan en el golfo de México (Hensler *et al.*, 2023). Caso específico es el río Actopan que desemboca en la Barra de Chachalacas en donde se pescan diversas especies de peces para consumo local y el turismo. Dentro de los peces de mayor consumo en la zona podemos mencionar el jurel blanco (*Carax latus*), el robalo (*Centropomus undecimalis*), la corvina ocelada (*Sciaenops ocellatus*) y la lisa (*Mugil liza*) (Becerril *et al.*, 2023). Donde en los últimos años ha llamado la atención, la continua observación de especies de *Diplostomum* en las cámaras oculares de los peces, estos parásitos presentan un ciclo biológico indirecto, que tienen como huéspedes definitivos las aves piscívoras, las cuales liberan huevos al medio acuático a través de sus heces, posteriormente la larva es ingerida por caracoles que actúan como primeros hospedadores intermediarios y luego se liberan como cercarías que pueden penetrar el te-

gumento, las branquias o los ojos de los peces y realizar una rápida migración, para transformarse después de 24 horas en metacercarias en el cristalino (Altamirano *et al.*, 2020).

La capacidad de diseminación de los huevos de *Diplostomum* y la poca especificidad parasitaria en las cámaras oculares de los peces, son las causas del cosmopolitismo de esta ictioparasitosis (Montesinos *et al.*, 2022). Al respecto, metacercarias de *Diplostomum* se han registrado en especies de peces dulceacuícolas como: *Cichlasoma*, *Oreochromis*, *Parachromis*, *Petenia*, *Thorichthys* y *Chirostoma*, de diversos embalses en los estados de Campeche, Yucatán, Tabasco, Chiapas, Veracruz, Michoacán, Oaxaca, Jalisco, San Luis Potosí e Hidalgo (Hernández, 2008). Sin embargo, no se han hecho estudios recientes para el golfo de México en zonas con actividad pesquera importante. Por lo que el objetivo de este estudio fue recopilar datos sobre la presencia de metacercarias de *Diplostomum* en peces capturados en la zona estuarina de Chachalacas Veracruz durante un periodo de 10 años.

Metodología

Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en la desembocadura del río Actopan, Chachalacas, Veracruz, ubicado en el municipio de Úrsulo Galván, que se encuentra entre los paralelos 19°24' y 19°30' de latitud norte; los meridianos 96°y 18' y 96°y 29' de longitud oeste (figura 1). Se recabaron datos de muestreo del 2014 al 2024 a excepción del 2022 que por motivos de la pandemia por COVID 19, no se efectuaron muestreos.

Obtención de los peces

Los peces fueron obtenidos mediante la técnica de "calado", utilizando una red de pesca de 250 metros, con una luz de malla de 10 cm (Becerril *et al.*,

2023). En cada uno de los muestreos se realizaron cuatro lanzamientos de red en la bocana donde se une el río con el mar. Los peces se mantuvieron en contenedores para su posterior identificación en el laboratorio. La identificación de los peces se llevó a cabo con las claves taxonómicas de De la Cruz *et al.* (2016) y Angulo *et al.* (2021). Con el fin de determinar la incidencia del género *Diplostomum* en la zona de Chachalacas, se realizaron tres muestreos por año.

Obtención de parásitos del género *Diplostomum*

Para la obtención de los parásitos, se examinaron las cavidades oculares de cada uno de los peces con



Figura 1. Localización geográfica de la zona de estudio (Becerril-Cortés, 2023).

una lupa. Se diseccionaron los ejemplares positivos para obtener los ojos, de donde se extrajeron los trematodos. Los parásitos obtenidos fueron fijados en alcohol al 70 %, etiquetados y almacenados en

viales para su posterior identificación. Para poder observar las estructuras los trematodos, se tiñeron durante 24 horas en paracarmin de Meyer, después fueron observados en un microscopio óptico.

Resultados

De los 376 peces analizados durante los distintos periodos de muestreo, se pudieron identificar 582 metacercarias del género *Diplostomum* en 10 especies de peces distintas (figura 2). Según los resultados obtenidos, 2014 y 2015 presentaron mayor incidencia parasitaria (tabla 1).

Frecuencia parasitaria por especie

En la figura 3, se puede observar que la lisa común (*Mugil cephalus*) presentó la mayor frecuencia para-

sitaria con un 20.96 %, seguida del robalo *Centro-pomus undecimalis* con un 16.67 %, mientras que el jurelito amarillo *Hemicarans leucurus* y el pez aguja *Belone belone* presentaron 0.17 % y 1.37 % respectivamente.

Por otra parte, es relevante mencionar el hallazgo de *Diplostomum* sp. en el pez *Belone belone* (aguja), cuyo ciclo de vida se desarrolla en aguas marinas, mientras que *Diplostomum* es un trématodo que principalmente parasita peces dulceacuícolas.

Discusión

La invasión es uno de los procesos más importantes en el ciclo de vida de los parásitos, cuyo objetivo es alcanzar al hospedador definitivo y perpetuar la especie (Ahuir-Baraja, 2020). La dispersión y la colonización son procesos de gran importancia cuando el parásito intenta ampliar su distribución

geográfica o colonizar nuevos hospedadores, estos procesos generalmente se llevan a cabo a través de huevos o quistes, los cuales presentan una mayor longevidad y resistencia a condiciones ambientales adversas (Doña et al., 2020). Las especies parásitas que tienen mayor amplitud hospedatoria son más



Tabla 1. Abundancia parasitaria en peces capturados en la localidad de Chachalacas, Veracruz.

| | Números de parásitos/ año | | | | | | | | | | Total de parásitos | Peces examinados |
|--------------------------------|---------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------|------------------|
| | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2023 | 2024 | | |
| <i>Mugil cephalus</i> | 25 | 17 | 4 | 6 | 10 | 8 | 24 | 14 | 5 | 9 | 122 | 88 |
| <i>Eugerres plumieri</i> | 12 | 8 | 20 | 11 | 9 | 5 | 9 | 6 | 3 | 6 | 89 | 40 |
| <i>Curema mugil</i> | 2 | 4 | 5 | 7 | 4 | 2 | 4 | 3 | 2 | 4 | 37 | 25 |
| <i>Eucinostomus argenteus</i> | 12 | 9 | 11 | 6 | 12 | 11 | 9 | 4 | 6 | 2 | 82 | 66 |
| <i>Oligoplites saurus</i> | 4 | 0 | 8 | 2 | 7 | 5 | 6 | 4 | 8 | 0 | 48 | 30 |
| <i>Centropomus undecimalis</i> | 10 | 22 | 10 | 5 | 14 | 6 | 2 | 8 | 15 | 5 | 97 | 75 |
| <i>Cynoscion nebulosus</i> | 2 | 1 | 0 | 0 | 2 | 3 | 0 | 4 | 2 | 0 | 14 | 8 |
| <i>Trachinotus sp.</i> | 4 | 6 | 12 | 12 | 6 | 6 | 10 | 16 | 8 | 4 | 84 | 42 |
| <i>Hemicarans leucurus</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| <i>Belone belone</i> | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 8 | 0 | 8 | 1 |
| | 67 | 70 | 49 | 64 | 46 | 64 | 59 | 43 | 15 | 34 | 582 | 376 |

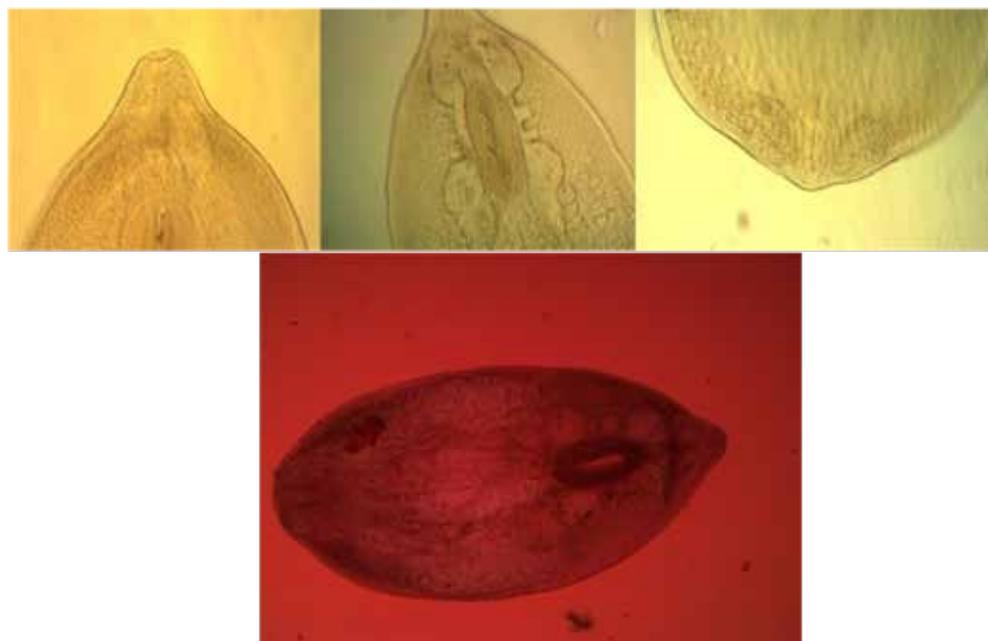


Figura 2. *Diplostomum* sp. visto al microscópio 10X.

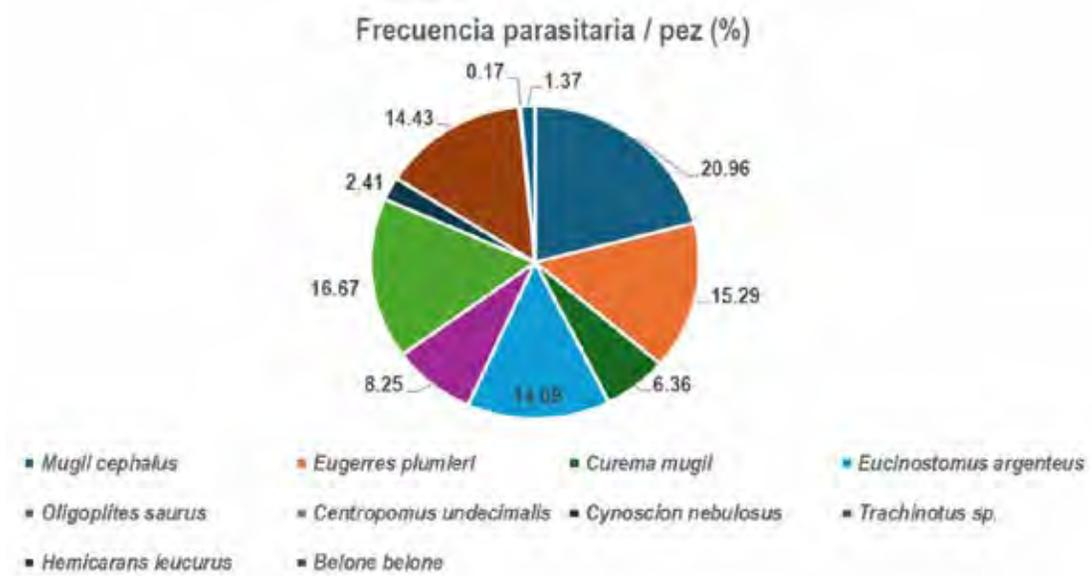


Figura 3. Frecuencia parasitaria por especie de pez

exitosas, siempre y cuando las condiciones, permitan asegurar que el ciclo de vida se complete (Bush et al., 2001).

Hablando de *Diplostomum*, este ha mantenido su prevalencia a lo largo de los años al ser un parásito de baja especificidad hospedatoria, quiere decir que parasita a una gran cantidad de peces, principalmente dulceacuícolas (Altamirano et al., 2020). En este estudio, se pudo comprobar que *Diplostomum* presenta una amplia capacidad de aumentar la diversidad de peces dulceacuícolas que parasita, sin embargo, presentó amplia variación en su frecuencia parasitaria a lo largo de 10 años, siendo 2014, el año con una mayor prevalencia de infección.

Según Maldonado et al. (2008), los trematodos son el segundo grupo más abundante de parásitos en México, anteriormente Locke et al. (2015), reportó la presencia de *Diplostomum* sp en *M. cephalus* en el estado de Guerrero.

En un estudio realizado por Becerril et al. (2023), se reportó que en la zona *M. cephalus* es la única especie que se ha mantenido relativamente constante en cuanto a su abundancia durante los últimos 10

años, lo que podemos relacionar con los resultados en este estudio, donde se pudo observar que la lisa fue la especie más parasitada, con 122 parásitos aislados de 88 peces, por lo que resultaría ser más susceptible a la infección por *Diplostomum*, debido a su abundante presencia en la zona.

Por otra parte, en esta investigación se reportan nuevos casos de infección por *Diplostomum* en las especies marinas: *H. leucurus* y *B. belone*. Aunque en el año 1967 en la bahía de Puck, Polonia, se obtuvo el parásito en *B. belone* (Rynkiewicz, 1970), no hay registros en el territorio mexicano, por lo que este podría ser el primer reporte. Se recomienda seguir realizando muestreos en las zonas estuarinas por la movilización de peces entre ecosistemas que podría incrementar la presencia de *Diplostomum* en especies marinas. La variedad de especies positivas para el trematodo en este estudio, confirma un amplio rango de infección, cabe a mencionar que especies de *Diplostomum* pueden modificar el comportamiento de su hospedero, para poder trascender a su fase adulta (Acosta et al., 2023). Lo que facilita un mayor éxito en la colonización del parásito.



Conclusión

De acuerdo con los resultados obtenidos podemos mencionar que se observaron características morfológicas que evidencia la presencia de metacercarias de *Diplostomum* en las cámaras oculares de los peces analizados, al observarse la forma típica ovalada y oblonga, la parte posterior corta y con una prominencia redondeada con la presencia de la ventosa

oral en el extremo anterior, utilizada para fijación y la ventosa ventral o acetábulo. Así mismo, debido a la prevalencia de este parásito a lo largo de los 10 años de estudio podemos concluir que *Diplostomum* es un parásito que comúnmente afecta a las principales especies capturadas como parte de la pesquería de Chachalacas, Veracruz.

Agradecimientos

Agradecemos a los pescadores de la playa de Chachalacas por el apoyo para realizar los muestreos.

Referencias

- Ahuir-Baraja, A.E. 2020. Parásitos: la biodiversidad olvidada. *Mediterráneo Económico*, 33: 213-234. <https://repositorioinstitucional.ceu.es/handle/10637/13390?locale=es>
- Altamirano A.S., Nieves A., Beltrán, Loredo L.D., Gorriti L., Marcia A.; Helen C., Mendiola B., Mariela M.M., Mayra J.P., Quispe A. 2020. Incidencia de *Diplostomum* spp. en el Karachi. *Agro-Vet [online]*. 4(1): 381-387. https://www.academia.edu/50982963/Incidencia_de_Diplostomum_spp_en_el_Karachi.
- Angulo, A., Coghi, A, y Sánchez, M. 2021. Claves para la identificación de los peces de las aguas continentales e insulares de Costa Rica. Parte I: Familias. *UNED Research Journal*, 13(27), 10.22458/urj.v13i1.3145.
- Becerril-Cortés, D., Monroy-Dosta, M.C., García-López, J., Solano-Rendón, R., Mata-Sotres, J.A. 2023. Panorama actual de la pesca ribereña en la desembocadura del río Actopan, Chachalacas, Veracruz (periodo 2014-2023). *JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático* 5(1): 41-50. doi 10.26359/52462.0323. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:265080220>
- Bush A.O., Fernández J.C., Esch G.W., Seed J.R. 2001. Parasitism. The diversity and ecology of animal's parasites. Cambridge University Press, UK, 566. DOI:10.1017/S0031182001008526.
- De la Cruz Torres, J., Pérez J., Badillo M., Flores L., Franco J. Chiappa-Carrara X. 2016. Familias de peces óseos del Golfo de México: clave ilustrada y descripción. UNAM. Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT IN219515) y del Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza (PAPIME PE206516) y de la Secretaría de Investigación, Innovación y Educación Superior (SIES). 183p.
- Doña, J., Sweet, A.D. Johnson, K.P. 2020. Comparing rates of introgression in parasitic feather lice with differing dispersal capabilities. *Commun Biol.*, 3, 610. <https://doi.org/10.1038/s42003-020-01345-x>
- Hensler L., Popoca Y., Hernández L. 2023. Enredos entre la ilegalidad y la mar: Un análisis de la regulación de la pesca artesanal en Veracruz. *Centro Mexicano de Derecho ambiental, A.C.*, 7-8. <https://www.cemda.org.mx/wp-content/uploads/2023/05/Informe-CEMDA-2023-Entre-la-ilegalidad-y-la-mar-1.pdf>
- Hernández D. 2008. Helmintología de *Chirostoma jordanii* Woolman (1894) en el lago de Tecocomulco, Hidalgo, México. Tesis para obtener el título de licenciado en Biología. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, México. https://www.academia.edu/26413168/Registro_helmintol%C3%B3gico_de_Chirostoma_jordanii_Woolman_1894_del_lago_de_Tecocomulco_Hidalgo_M%C3%A9xico
- Locke S.A, Al-Nasiri F.S., Caffara M., Drago F., Kalbe M., Lapierre A.R., McLaughlin J.D., Nie P., Overstreet R.M., Souza G.T., Takemoto R.M., Marcogliese D.J. 2015. Diversity, specificity and speciation in larval *Diplostomidae* (Platyhelminthes: Digenea) in the eyes of freshwater fish, as revealed by DNA barcodes. *Int J Parasitol.* Nov;45(13):841-55. doi: 10.1016/j.ijpara.2015.07.001. Epub 2015 Aug 11. PMID: 26276524.
- Maldonado I., Acuña I., Rivero Z., Chourio G., Díaz I., Calchi M., *et al.* (2008). Prevalencia de enteroparasitosis y factores ambientales asociados en dos comuni-



- dades indígenas del estado Zulia. *Kasmera*. 36: 53-66. https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0075-52222008000100007
- Montesinos, J., Serrano T., Yáñez, J., Flores-Mara, R. 2022. Ultra-structural characterization of *Diplostomum* sp metacercarian in *Orestias luteus* from Lake Titicaca, Peru. *Revista Veterinaria*, 33. 215-219. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:255178517>
- Rynkiewicz, J. 1970. The parasite fauna of gar-fish *Belone belone* (L.) from Puck Bay parazytofauna Belony *Belone belone* (L.) Z Zatoki Puckiej. *Acta Ichthyologica et Piscatoria* 1(104). <https://aiiep.pensoft.net/article/24726/>

Aké Turriza, K.A., Cahuich Cruz, O.D., Díaz Lázaro, M., Mas Qui, O.O., Pan Barcel, J.A., Rivera-Arriaga, E., y Peña-Puch, AC. 2025. Diagnóstico del Manejo Integrado Costero en Manzanillo, Colima: gobernanza, modelos de evaluación y estrategias de resiliencia. JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático 7(1): 27-54. doi 10.26359/52462.0703



Diagnóstico del Manejo Integrado Costero en Manzanillo, Colima: gobernanza, modelos de evaluación y estrategias de resiliencia

Diagnosis of Integrated Coastal Management in Manzanillo, Colima: governance, evaluation models, and resilience strategies

Karianna A. Aké Turriza^{1}, Osmar D. Cahuich Cruz², Marina Díaz Lázaro¹, Oscar O. Mas Qui¹, Javier A Pan Barcel¹, Evelia Rivera-Arriaga³ y Angelina C. Peña-Puch^{2,3*}*

¹Posgrado Multidisciplinario para el Manejo de la Zona Costero-Marina, Instituto EPOMEX Universidad Autónoma de Campeche

²Facultad de Ciencias Sociales, Universidad Autónoma de Campeche.

³Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía (EPOMEX), Universidad Autónoma de Campeche.

* autor de correspondencia: al041220@uacam.mx; angcpena@uacam.mx

doi 10.26359/52462.0703

Recibido 22/enero/2025. Aceptado 20/mayo/2025

JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático

Coordinación editorial de este número: Yassir E. Torres Rojas

Este es un artículo bajo licencia Creative Commons CC BY-NC-ND.



Resumen

El Manejo Integrado de la Zona Costera (MIZC) en Manzanillo, Colima, es clave para la sostenibilidad de sus recursos y comunidades. Las zonas costeras sustentan actividades esenciales como pesca, turismo y agricultura, pero enfrentan amenazas por el cambio climático, que aumenta su vulnerabilidad. Este estudio analiza la aplicación de modelos como Presión-Estado-Respuesta (PER), el Decálogo del MIZC (Barragán, 2014) y la economía azul para abordar estos desafíos. La caracterización ambiental, social y económica de la región destaca problemáticas como la sobreexplotación de ecosistemas, deficiencias en gobernanza y la necesidad de estrategias de resiliencia. Se identifican riesgos asociados a la elevación del nivel del mar, erosión costera e inundaciones, resaltando la importancia de medidas de adaptación basadas en análisis de riesgo y costo-beneficio. Asimismo, se examina la gobernanza costera, proponiendo mejoras en la distribución de responsabilidades, educación en sostenibilidad y participación comunitaria. La economía azul ofrece oportunidades para un crecimiento más equilibrado, aunque enfrenta retos en su integración con el manejo costero. El estudio concluye con recomendaciones prácticas para fortalecer la gestión costera en Manzanillo, promoviendo políticas de conservación, financiamiento sostenible y gobernanza participativa. Estas estrategias buscan consolidar un marco resiliente y adaptativo que garantice la protección de los ecosistemas y la seguridad de las comunidades costeras ante los efectos del cambio climático.

Palabras claves: Manzanillo, Manejo integrado costero, adaptación climática, modelo FEPEIR, economía azul.

Abstract

Integrated Coastal Zone Management (ICZM) in Manzanillo, Colima, is key to the sustainability of its resources and communities. Coastal areas support essential activities such as fishing, tourism and agriculture, but face threats from climate change, which increases their vulnerability. This study analyzes the application of models such as Pressure-State-Response (PSR), the ICZM Decalogue (Barragán, 2014) and the blue economy to address these challenges. The environmental, social and economic characterization of the region highlights problems such as the overexploitation of ecosystems, deficiencies in governance and the need for resilience strategies. Risks associated with sea level rise, coastal erosion and flooding are identified, highlighting the importance of adaptation measures based on risk and cost-benefit analysis. Likewise, coastal governance is examined, proposing improvements in the distribution of responsibilities, sustainability education and community participation. The blue economy offers opportunities for more balanced growth, although it faces challenges in its integration with coastal management. The study concludes with recommended practices to strengthen coastal management in Manzanillo, promoting conservation policies, sustainable financing and participatory governance. These strategies seek to consolidate a resilient and adaptive framework that guarantees the protection of ecosystems and the safety of coastal communities in the face of the effects of climate change.

Keywords: Manzanillo, Integrated coastal management, climate adaptation, PER model, blue economy



Introducción

Las zonas costeras albergan ecosistemas altamente productivos, esenciales para la pesca, la agricultura y el turismo. Sin embargo, son extremadamente vulnerables a la intervención humana y al cambio climático, lo que acelera su degradación, incrementando riesgos de inundaciones, erosión costera y pérdida de biodiversidad.

En este contexto, Manzanillo, Colima, enfrenta problemáticas ambientales agravadas por el aumento del nivel del mar y el cambio climático, amenazando tanto los ecosistemas costeros como las comunidades locales. Como principal puerto del Pacífico mexicano, su crecimiento en infraestructura portuaria y turística ha generado presión sobre los recursos naturales y el equilibrio ecológico (Hernández-López *et al.*, 2020).

La deforestación de manglares, causada por la expansión de infraestructura y turismo, ha reducido su capacidad como barrera natural contra eventos extremos, limitando su efectividad ante inundaciones y erosión. La contaminación de cuerpos de agua, derivada de actividades industriales y ur-

banas, deteriora la calidad del agua, afectando a comunidades pesqueras y la biodiversidad marina (Antúnez, 2024; IPEN, 2022).

El cambio climático intensifica huracanes en el océano Pacífico, aumentando riesgos para la infraestructura costera y generando marejadas e inundaciones (Alonso *et al.*, 2019). Además, el nivel del mar aumenta 3.4 mm anuales, afectando infraestructuras críticas, áreas residenciales y ecosistemas clave, como manglares y playas, que actúan como amortiguadores naturales (IPCC, 2021). Esto acelera la erosión costera y pone en riesgo la infraestructura local (Pang *et al.*, 2023).

Para enfrentar estos desafíos, es clave integrar la conservación de ecosistemas y la infraestructura resiliente en el manejo costero. La restauración de manglares y zonas de amortiguamiento protege la biodiversidad y fortalece la resiliencia costera. Además, el desarrollo sostenible es esencial para regular la expansión urbana y mitigar la contaminación (Gómez & Pérez, 2020).

Caracterización de la zona costera de Manzanillo, Colima

Ubicación geográfica

El municipio de Manzanillo, ubicado en la costa de Colima, se localiza aproximadamente a 19°03' latitud norte y 104°19' longitud oeste (figura 1). Limita al norte con Minatitlán, al este con Armería, y al sur y oeste con el océano Pacífico (INEGI, 2020). Su territorio abarca 1 578 km² y una línea costera de 66 km, con bahías, playas y áreas naturales que impulsan el turismo, la pesca y las actividades portuarias (Gobierno del Estado de Colima, 2019; Secretaría de Turismo de Colima, 2021). Su ubicación lo consolida como uno de los principales puertos comerciales de México, clave para el comercio internacional, la biodiversidad marina y la conectividad ecológica, destacándose como un

destino turístico relevante en el Pacífico mexicano (API Manzanillo, 2022; CONABIO, 2021; SEMARNAT, 2020).

Caracterización ambiental

La zona costera de Manzanillo alberga manglares, arrecifes de coral, dunas costeras y praderas marinas, ecosistemas clave para la biodiversidad y estabilidad ambiental (INEGI, 2020; SEMARNAT, 2024).

Los manglares, como el mangle rojo (*Rhizophora mangle*) y el mangle negro (*Avicennia germinans*), filtran contaminantes, estabilizan sedimentos y brindan hábitat a peces y crustáceos (INECC, 2023). Los arrecifes de coral, aunque limitados,



Figura 1. Ubicación geográfica de Manzanillo, Colima. Fuente: Elaboración propia

albergan especies como el pez ángel (*Holocanthus passer*) y el pez payaso (*Amphiprioninae*). Las dunas costeras reducen la erosión y ofrecen refugio a reptiles e insectos, mientras que las praderas de pastos marinos (*Thalassia testudinum*) estabilizan el lecho marino y sirven de criadero para especies juveniles (SEMARNAT, 2024).

Los bosques tropicales caducifolios brindan estabilidad climática y hábitat, perdiendo sus hojas en la temporada seca para resistir la escasez de agua (Siyum, 2020).

La fauna marina es diversa y fundamental para la pesca y el turismo. Destacan el pez vela (*Istiophorus platypterus*), el dorado (*Coryphaena hippurus*) y crustáceos de alto valor comercial (API Manzanillo, 2021). Además, Manzanillo es un sitio clave para aves migratorias como la garza blanca (*Ardea alba*), el pelícano pardo (*Pelecanus occidentalis*) y diversas especies de gaviotas, indicadores de la salud del ecosistema costero (INEGI, 2023)

Caracterización social

La población de Manzanillo, de 200 000 habitantes, ha crecido por la migración laboral vinculada al puerto, turismo y otras actividades económicas (INEGI, 2020). Este crecimiento ha enriquecido la diversidad cultural, pero plantea desafíos en la integración social y acceso a servicios básicos, especialmente en asentamientos informales.

El turismo, con más de 2 millones de visitantes en 2019, es vital para la economía local (González, 2021). Sin embargo, su auge ejerce presión sobre la infraestructura y los recursos naturales, requiriendo estrategias sostenibles para mitigar impactos (SEMARNAT, 2024).

El 30 % de la población vive en pobreza (Red de Derechos Humanos, 2020). La falta de educación y capacitación perpetúa la desigualdad, limitando el desarrollo, especialmente en zonas rurales e informales.



Manzanillo depende del turismo y la pesca, lo que hace a sus comunidades costeras vulnerables ante fenómenos climáticos y políticas ambientales (INEGI, 2020). Las regulaciones pesqueras, restricciones turísticas y normativas de conservación pueden limitar las oportunidades económicas de pescadores y trabajadores turísticos, generando incertidumbre, especialmente en temporadas bajas. Además, su ubicación costera expone viviendas a inundaciones y erosión, agravadas por el aumento del nivel del mar debido al cambio climático (CONAPO, 2021).

El crecimiento urbano desorganizado ha generado asentamientos informales en áreas de riesgo, con falta de planificación y servicios básicos como agua potable y saneamiento (Gobierno de Colima, 2021).

Caracterización económica

Manzanillo, es clave para la economía nacional e internacional por su ubicación estratégica y su rol en el comercio internacional. Su puerto, el más importante de México en volumen de contenedores, gestiona más del 40 % del comercio marítimo nacional (SCT, 2020). Esta actividad genera miles de empleos directos e indirectos, impulsando sectores como el transporte, la logística y el comercio (API Manzanillo, 2021; SCT, 2021). Sin embargo, la expansión portuaria plantea desafíos ambientales, afectando la calidad del aire, el agua y los ecosistemas costeros (SEMARNAT, 2024).

El turismo, con playas e infraestructura hotelera atraen a turistas nacionales e internacionales, fortaleciendo la economía local. Sin embargo, el aumento de visitantes ejerce presión sobre la infraestructura y la gestión de residuos (Cruz Salas *et al.*, 2020).

La pesca artesanal y la agricultura de subsistencia son esenciales, pero la sobrepesca ha reducido especies clave, afectando la rentabilidad pesquera.

Además, la escasez de agua y los cambios climáticos representan desafíos para la agricultura (Estrada *et al.*, 2022). Estas limitaciones incrementan la vulnerabilidad económica de las comunidades dependientes de estos sectores.

Caracterización geológica

Manzanillo, ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico, es una de las regiones tectónicas más activas del mundo, propensa a terremotos y actividad volcánica, lo que es clave para la planificación de infraestructuras. Sus formaciones geológicas, compuestas por rocas ígneas y sedimentarias, influyen en la estabilidad del suelo y el uso del territorio para fines urbanos e industriales (Valdez-Moreno *et al.*, 2006; Norini *et al.*, 2010).

La actividad sísmica y la proximidad a la costa aumenta el riesgo de tsunamis, destacando la necesidad de planes de evacuación y sistemas de alerta temprana (CONAGUA, 2020).

Manzanillo cuenta con agua subterránea de calidad variable y minerales disponibles en moderada cantidad. Su gestión sostenible es esencial para el abastecimiento de agua y el desarrollo industrial y agrícola. La calidad del agua subterránea requiere vigilancia constante para evitar su deterioro por la actividad humana (Hernández *et al.*, 2020).

Zona Federal Marítimo Terrestre (ZOFEMAT)

La ZOFEMAT en México es una franja de terreno de 20 metros de ancho, contigua a la playa y transitable, que se mide a partir de la pleamar máxima (figura 2). Esta zona, es propiedad de la nación y está regulada por la Ley General de Bienes Nacionales y el Reglamento para el Uso y Aprovechamiento del Mar Territorial, Vías Navegables, Playas, Zona Federal Marítimo Terrestre y Terrenos Ganados al Mar” (PROFEPA, 2016).



Figura 2. Delimitación de la Zona Federal Marítimo Terrestre. (ZOFEMAT) para Manzanillo, Colima. Fuente: Elaboración propia

Problemática sistema socio-ecologicos en Manzanillo, Colima

Actividades económicas en riesgo

Comercio Marítimo

El Puerto de Manzanillo, el principal de México en la costa del Pacífico desempeña un papel clave en el comercio internacional, especialmente con Asia (SCT, 2023). Maneja automóviles, productos agrícolas y diversas mercancías, consolidándose como un centro logístico de clase mundial con terminales especializadas (SCT, 2023). Sin embargo, enfrenta congestión y tiempos de espera debido a la alta demanda, afectando la eficiencia logística (IMT, 2022). Además, su expansión portuaria ejerce presión sobre los ecosistemas costeros, amenazando la biodiversidad (SCT, 2023).

Turismo

Las playas de Manzanillo, como Playa La Audiencia y Playa Santiago, atraen a turistas nacionales e internacionales, generando empleo y promoviendo restaurantes y comercio local (Amaya Molinar *et*

al., 2018; SECTUR, 2023). Sin embargo, la alta afluencia provoca contaminación, presión sobre los recursos naturales y afecta los ecosistemas costeros debido a la infraestructura turística y el aumento de residuos (SEMARNAT, 2024).

Pesca

La pesca es una actividad económica tradicional en Manzanillo, donde especies como el atún y el camarón son fundamentales para la economía local. Además, la pesca deportiva atrae a turistas, complementando la economía regional (INEGI, 2020). Sin embargo, la sobrepesca y la degradación de hábitats marinos debido a la contaminación y el cambio climático representan amenazas para la sostenibilidad de este sector (Oceana México, 2024).

Agricultura

La región de Manzanillo produce cultivos como melón, papaya y aguacate para el consumo local y de exportación (INEGI, 2020). Sin embargo, el



sector agrícola enfrenta desafíos relacionados con el uso intensivo de agua y la degradación de suelos debido a prácticas agrícolas convencionales. Además, el cambio climático incrementa la frecuencia de sequías, afectando la productividad agrícola (SADER, 2023).

Industrias Energéticas

Manzanillo alberga plantas termoeléctricas que abastecen de energía eléctrica al estado de Colima y apoyan el desarrollo industrial (CFE, 2023). Sin embargo, contribuyen a la contaminación atmosférica y a las emisiones de gases de efecto invernadero (SEMARNAT, 2024). El desarrollo de energías renovables, como la solar y eólica, busca diversificar la matriz energética y reducir el impacto ambiental, aunque enfrenta desafíos de financiamiento e integración tecnológica (CFE, 2023).

Minería

La región de Manzanillo cuenta con yacimientos de hierro, explotados por empresas mineras, que impulsan la economía local y generan empleo (INEGI, 2020). Sin embargo, la minería provoca deforestación, alteración del suelo y contaminación de cuerpos de agua (SEMARNAT, 2024). Se requiere una regulación más estricta y prácticas de minería sostenible para minimizar estos impactos. Ecosistemas y Recursos Naturales en Riesgo.

Ecosistemas y Recursos Naturales en Riesgo

Inundaciones

En julio de 2024, intensas lluvias provocaron inundaciones severas en varias colonias de Manzanillo,

incluyendo el Centro Histórico y el Boulevard Miguel de la Madrid. Estos eventos afectaron la movilidad y la infraestructura urbana (SEGOB, 2024). La topografía urbana y la saturación de drenajes agravan el problema, subrayando la necesidad de mejorar el manejo de aguas pluviales (INECC, 2023).

Deslizamientos de Tierra

Durante la tormenta tropical “Hernán” en 2020, se registraron deslizamientos de tierra en áreas como Tapeixtles y El Colomo, afectando viviendas y carreteras locales (INEGI, 2020). La inestabilidad del terreno, agravada por lluvias intensas, aumenta el riesgo en zonas montañosas (INECC, 2023).

Fenómenos Meteorológicos Extremos

Manzanillo ha sufrido impactos de huracanes intensos, como el huracán Patricia en 2015, cuyos vientos destructivos y lluvias intensas causaron daños significativos en la infraestructura (NHC & CPHC, 2016). Un estudio (1981-2018) reveló que los eventos de precipitación extrema son más frecuentes en septiembre, aumentando la vulnerabilidad regional (SMN, 2019).

Contaminación y Derrames

En diciembre de 2019, un derrame de hidrocarburo en el Puerto Interior de Manzanillo requirió la intervención de PROFEPA para contener el impacto ambiental (PROFEPA, 2016). En junio de 2023, una nube tóxica causada por un derrame químico generó preocupación por la calidad del aire, aunque autoridades descartaron riesgos inmediatos (SEMARNAT, 2024).

Diagnóstico del Manejo Costero - Modelo PER

En el marco del Modelo Presión- Estado – Respuesta (PER), se han realizado investigaciones sobre el impacto de la erosión costera en zonas vulnerables como Manzanillo (figura 3). El programa

analiza los cambios en los ecosistemas costeros y sus implicaciones para la biodiversidad y las actividades humanas (Gobierno de México, 2022).



Figura 3. Modelo Presión- Estado-Respuesta, Manzanillo, Colima. Fuente: Elaboración propia.

Evaluación de riesgo y vulnerabilidad

Evaluación de riesgos actuales y futuros

La tabla 1 presenta la evaluación de riesgos costeros en Manzanillo, Colima, basada en estudios recientes sobre amenazas naturales y vulnerabilidad, considerando los riesgos climáticos y la ubicación estratégica del puerto como nodo comercial en el Pacífico mexicano (API Manzanillo, 2021).

Modelo de Evaluación de Riesgos

El análisis se basó en un modelo que emplea criterios de probabilidad de ocurrencia, evaluando la exposición y vulnerabilidad de la región a eventos naturales como huracanes e inundaciones. Los criterios de evaluación fueron los siguientes:

- Probabilidad alta: Eventos recurrentes con impacto anual o menor.
- Probabilidad media: Eventos con un ciclo de retorno de entre 5 y hasta 20 años.
- Probabilidad baja: Eventos raros con un retorno superior a 20 años.

Este diagnóstico se fundamenta en la recopilación de mapas de vulnerabilidad (INPLAN, 2024) y estudios previos sobre Manzanillo (AMIMP, 2023), que reflejan la exposición de infraestructu-

ras críticas y comunidades locales a los efectos del cambio climático y fenómenos naturales.

Gobernanza y Manejo Costero en Manzanillo

La gobernanza del MIZC en Manzanillo involucra múltiples actores, desde instituciones gubernamentales hasta comunidades locales, empresas turísticas y organizaciones ambientales. Sin embargo, la falta de coordinación entre niveles de gobierno y el escaso involucramiento de actores comunitarios han limitado su efectividad (Barragán, 2012).

El análisis de actores clave muestra que, aunque existe un marco regulatorio sólido, la implementación de estrategias enfrenta barreras como burocracia, falta de financiamiento y conflictos de intereses entre el sector portuario, turismo y conservación ambiental (OECD, 2023; INECC, 2021). Además, los mecanismos de participación ciudadana siguen siendo limitados, con poca representación de pescadores, trabajadores turísticos y comunidades costeras en la toma de decisiones (Gómez *et al.*, 2020).

Para fortalecer la gobernanza costera, se recomienda:



Tabla 1. Evaluación de Riesgos costeros en Manzanillo, Colima. Fuente: Elaboración propia.

| Tipo de riesgo | Descripción | Probabilidad (actual) | Probabilidad (futura) | Impacto potencial |
|---------------------------|---|-----------------------|-----------------------|--|
| Inundaciones por ciclones | Aumento del nivel del mar e inundaciones por huracanes. | Alto | Alto | Daños materiales y pérdida de vidas; afectación a infraestructura. |
| Erosión costera | Pérdida de playas por oleaje intenso y cambio climático. | Medio | Alto | Reducción de territorio y afectaciones al turismo y la pesca. |
| Tsunamis | Olas grandes generadas por sismos en el Pacífico. | Bajo | Medio | Daños extensos en la costa y áreas residenciales. |
| Deslizamiento de tierra | Desplazamiento de suelo en áreas costeras por lluvias intensas. | Medio | Medio | Bloqueo de vías y daños a infraestructuras. |
| Huracanes | Tormentas de alta categoría con mayor frecuencia e intensidad. | Medio | Alta | Perdida significativa de bienes y servicios. |

- Fomentar mecanismos de co-gestión entre comunidades y gobiernos locales (UNDRR, 2024).
- Establecer un comité de manejo costero con representación equitativa de los sectores involucrados (Hernández *et al.*, 2020).
- Integrar a la academia y centros de investigación en la formulación de estrategias de resiliencia costera (CENAPRED, 2020).

Acciones de Manejo (Análisis Costo-Beneficio)

Para evaluar la viabilidad y eficiencia de diferentes estrategias de mitigación y adaptación a riesgos costeros y climáticos en Manzanillo, se realizó un análisis costo-beneficio (ACB), fundamentado en literatura científica, reportes técnicos y evaluaciones de riesgo climático y socioeconómico (Jiménez-Arenas, 2020; BID, 2023). Este análisis permitió comparar los costos de implementación, mantenimiento y operación de cada medida con los beneficios en términos de reducción de impactos en la infraestructura y conservación de ecosistemas costeros. Se analizaron dos enfoques principales: Medidas de Adaptación Basadas en Ecosistemas (AbE), que incluyen la restauración de manglares y la protección de arrecifes como barreras naturales contra inundaciones y oleajes extremos, reduciendo la necesidad de infraestructura gris (Spalding *et*

al., 2014; Narayan *et al.*, 2016), y la Infraestructura de Protección Costera, que comprende la construcción de diques y muros de contención en áreas vulnerables, aunque con costos elevados e impactos ambientales significativos (Beck & Lange, 2016).

Para la evaluación, se cuantificaron los costos y beneficios de cada estrategia mediante estimaciones basadas en fuentes secundarias y análisis comparativos con estudios previos sobre infraestructura y adaptación costera (Seddon *et al.*, 2020; PNUMA, 2022). Además, se evaluó el riesgo residual y los costos de inacción, determinando los posibles impactos económicos y sociales de no aplicar medidas de adaptación ante eventos climáticos extremos (IPCC, 2022). La omisión de estrategias de mitigación podría derivar en pérdidas económicas sustanciales y daños irreversibles en la infraestructura, el comercio y el turismo (OECD, 2021; Rivera-Arriaga & Villalobos-Zapata, 2012).

Sistemas en Riesgo

La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR), define al riesgo como la probabilidad de pérdidas de vidas, lesiones o destrucción y daños a causa de un desastre en un período de tiempo determinado, y por tanto lo expresa como:

$$\text{Riesgo de Desastres} = \text{Peligro} \times \text{Exposición} \times \text{Vulnerabilidad (UNDRR, 2024)}$$



Los desastres suelen percibirse como impactos externos, pero surgen de la interacción entre peligros, exposición y vulnerabilidad derivados de procesos de desarrollo. El riesgo resulta de la combinación entre la gravedad y frecuencia del peligro, la cantidad de personas y bienes expuestos, y su vulnerabilidad a los daños.

Antecedentes históricos de desastres

Manzanillo ha experimentado eventos naturales severos como huracanes y tormentas tropicales, afectando infraestructura, viviendas y ecosistemas costeros. Este historial subraya la importancia de una gestión adecuada del riesgo.

Sistema natural

El sistema natural de Manzanillo, Colima, incluye zonas clave como la Laguna de Cuyutlán, que protege contra inundaciones y alberga biodiversidad (INEGI, 2020). Las playas de Miramar y La Audiencia son esenciales para el turismo y la protección costera, mientras que los arrecifes de coral en la Bahía de Santiago sostienen la pesca local y son hábitat de diversas especies marinas. Estos ecosis-

temas enfrentan amenazas como el desarrollo urbano, la contaminación y el cambio climático, que elevan el nivel del mar y aumentan la temperatura (IPCC, 2022). Conservar y restaurar estas áreas es vital para garantizar su función ecológica, económica y la sostenibilidad regional. (figura 4).

Sistema urbano y de infraestructura

El sistema urbano e infraestructura de Manzanillo, Colima, destaca por su posición estratégica como uno de los puertos más importantes de México. El Puerto de Manzanillo es el motor económico principal, con infraestructura clave para el comercio marítimo y el transporte terrestre, conectando con el resto del país. La ciudad también cuenta con instalaciones turísticas e industriales que fortalecen su desarrollo. Sin embargo, enfrenta retos como el rápido crecimiento urbano, que presiona los servicios básicos y la movilidad, además de la vulnerabilidad a huracanes e inundaciones (CENAPRED, 2020). Es esencial fomentar un desarrollo sostenible que mejore la conectividad, integre áreas verdes y refuerce la resiliencia climática (figura 5).



Figura 4. Sistema natural de Manzanillo Fuente: Elaboración propia.

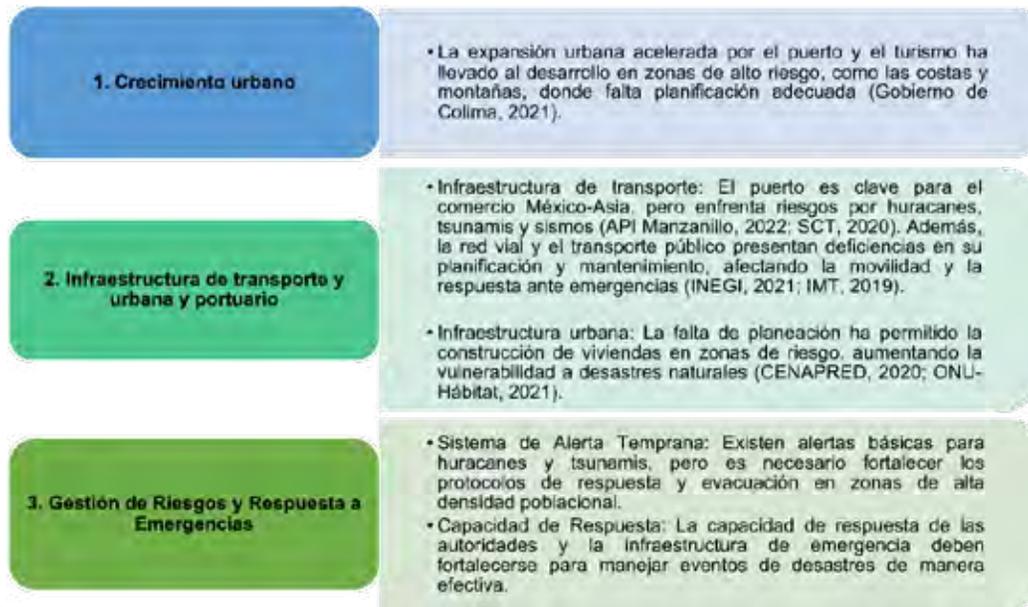


Figura 5. Subsistema urbano y de infraestructura de Manzanillo Fuente: Elaboración propia

Sistema económico

Manzanillo, Colima, tiene un sistema económico basado en el turismo, el comercio marítimo y la pesca, actividades esenciales para su desarrollo regional. Su población económicamente activa representa el 66.1 %, con una baja tasa de desempleo del 2.21 % (Gobierno Municipal de Manzanillo, 2024b). Sin embargo, enfrenta retos como desastres naturales que afectan la infraestructura y disminuyen la actividad turística. Los ecosistemas marinos, como manglares y arrecifes, son fundamentales para la pesca, pero su degradación impacta directamente la economía (Sol-Sánchez et al., 2022).

Sistema social

El municipio de Manzanillo es el más poblado del Estado de Colima con 191 031 habitantes. Mientras que las delegaciones más pobladas son: Santiago: 48378 habitantes; Salagua: 36 945 habitantes; Valle de las Garzas: 29 971 habitantes; Zona Centro: 13 861 habitantes y El Colomo: 9583 habitantes (Gobierno Municipal Manzanillo, 2024b) (figura 7).

Evaluación de amenazas, exposición y vulnerabilidad

La UNDRR (2024) define los siguientes términos como:

- **Amenaza:** Proceso, fenómeno o actividad humana que puede causar pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos sobre la salud, daños materiales, perturbaciones sociales y económicas o degradación ambiental. Los peligros pueden ser de origen natural, antropogénico o socioambiental.
- **Exposición:** Situación de las personas, la infraestructura, la vivienda, las capacidades de producción y otros activos humanos tangibles ubicados en zonas propensas a riesgos.
- **Vulnerabilidad:** Característica determinada por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales que aumentan la susceptibilidad de un individuo, una comunidad, activos o sistemas a los impactos de los peligros. Esta varía de acuerdo con el transcurso del tiempo y el espacio.
- **Riesgo de desastre:** ocurren cuando un peligro natural impacta un sistema socioeconómico

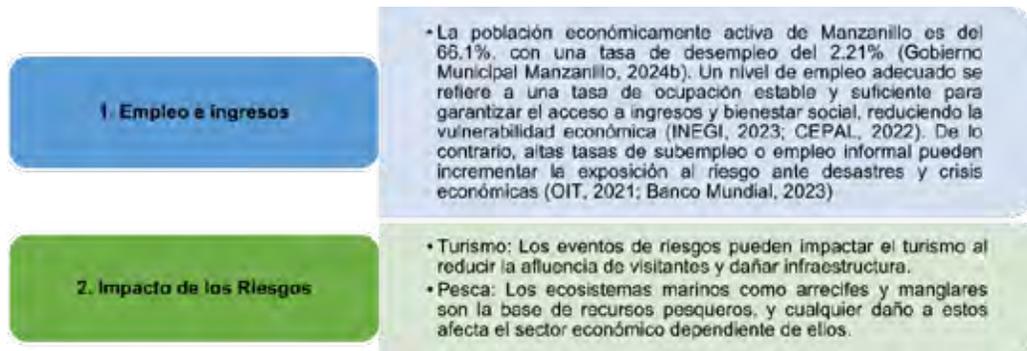


Figura 6. Sistema económico de Manzanillo Fuente: Elaboración propia.

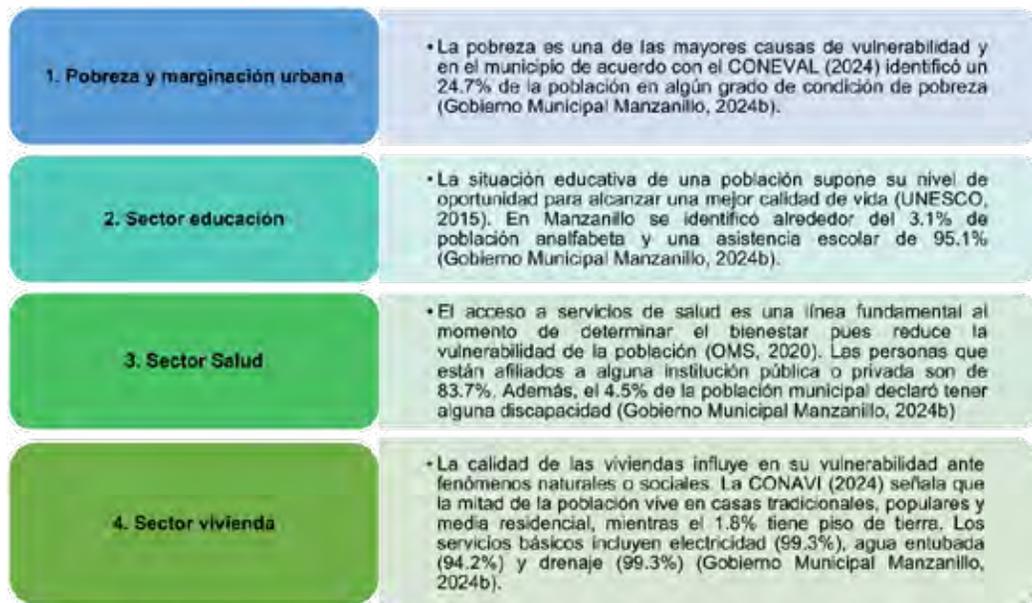


Figura 7. Sistema social y de salud de Manzanillo Fuente: Elaboración propia.

vulnerable, superando su capacidad de respuesta. Surgen de la combinación entre amenazas, vulnerabilidad y capacidades limitadas de comunidades e instituciones para enfrentar y mitigar los riesgos resultantes.

Un desastre se produce cuando se dan tres condiciones al mismo tiempo:

- Asentamientos en lugares potencialmente peligrosos, por ejemplo, cerca o dentro del cauce de ríos que se pueden desbordar.

- Fenómeno extremo (la amenaza), por ejemplo, precipitaciones intensas y concentradas.
- Si no se cuenta con una eficiente gestión del riesgo para evitar que el fenómeno provoque daños.

La evaluación de amenazas, exposición y vulnerabilidad en Manzanillo es un paso importante para comprender los riesgos a los que se enfrenta esta ciudad costera y cómo sus características sociales, económicas y ambientales aumentan la posibilidad de sufrir daños ante fenómenos naturales (tabla 2).



Tabla 2. Principales amenazas para Manzanillo, Colima.
Fuente: Gobierno Municipal Manzanillo, (2012 y 2024b).

| Tipo | Fenómeno | Grado de peligro |
|----------------------|--|------------------|
| Hidrometeorológico | Ciclón, tormenta y depresión tropical | Muy alto |
| | Inundaciones pluviales, fluviales y costeras | Alto – Muy alto |
| | Inundaciones subterráneas, lacustres | Medio |
| | Granizadas, corrientes de retorno, tormentas eléctricas, sequías | Bajo |
| | Ondas de calor | Medio |
| Geológico | Sismos | Muy alto |
| | Inestabilidad de laderas, tsunamis | Alto |
| | Hundimientos, erosión costera | Medio |
| | Erupciones volcánicas | Bajo |
| Químico-tecnológico | Almacenamiento de sustancias peligrosas | Medio |
| | Autotransporte y transporte ferroviario de sustancias peligrosas | Medio |
| | Transporte por ductos | Medio |
| | Incendios forestales | Alto |
| Sanitario-ecológicos | Contaminación de suelo, aire y agua | Medio |
| | Epidemias y plagas | Medio |
| Socio-organizativos | Concentración masiva de población | Moderado |
| | Vandalismo | Bajo |
| | Terrorismo | Muy bajo |

Identificación de usuarios y actores clave

Manzanillo enfrenta diversos riesgos derivados de su ubicación costera, su actividad portuaria y la vulnerabilidad a fenómenos naturales como huracanes, sismos y tsunamis. Para abordar estos riesgos y la vulnerabilidad de la población, es importante identificar a los usuarios y actores clave que desempeñan un papel importante en la gestión de riesgos, la resiliencia y la respuesta ante desastres (Adger, 2006; Lin *et al.*, 20). En la tabla 3, se presenta una lista de los actores clave y usuarios involucrados en la gestión de riesgos y vulnerabilidades en Manzanillo.

La dinámica organizacional produce la reunión de disciplinas, técnicas, ciencias y funciones que facilitan la aproximación armónica de estructura, personas, procesos y recursos, donde la participación de las personas dentro de los procesos referentes a su bienestar permite una adecuada dinámica organizativa (Rincón-Quintero, 2013).

Marco Regulatorio y Legal

México cuenta con un marco legal integral para el desarrollo urbano y la protección de la población, sustentado en la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CPEUM) y diversas normativas. La CPEUM establece el derecho a un medio ambiente sano y a la vivienda digna (Artículo 4°), regula la propiedad de la tierra y su uso (Artículo 27°) y otorga a los municipios la facultad de ordenar el desarrollo urbano (Artículo 115°) (DOF, 2021). A nivel legislativo, la Ley General de Asentamientos Humanos, Ordenamiento Territorial y Desarrollo Urbano establece criterios para el crecimiento sostenible (SEDATU, 2016), mientras que la Ley General de Protección Civil y la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente incorporan estrategias para la reducción del riesgo de desastres y la protección ambiental (CENAPRED, 2020). Complementariamente, las Normas Oficiales Mexicanas (NOMs) regulan la seguridad estructural y la planificación territorial



Tabla 3. Usuarios y Actores Clave del municipio de Manzanillo. Fuente: Elaboración propia.

| Usuarios | Actores clave |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Población en general de Manzanillo • Turistas • Trabajadores del puerto • Trabajadores del sector industrial • Flota pesquera • Pescadores artesanales • Grupos de artesanos • Comités comunitarios • Agricultores • Sector hotelero | <ul style="list-style-type: none"> • Coordinación Nacional de Protección Civil • Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) • SEDENA PLAN DN-III-E • Gobierno del Estado de Colima • Secretaría de Protección Civil del Estado de Colima • Secretaría de Salud del Estado de Colima • H. Ayuntamiento de Manzanillo • Administración Portuaria Integral de Manzanillo (APIMAN) • Cruz Roja Mexicana – Delegación Colima • Policía Municipal • Comité Municipal de Emergencia |

(DOF, 2023). Este marco normativo busca garantizar un desarrollo urbano resiliente y sostenible, reduciendo la vulnerabilidad ante riesgos ambientales y sociales.

Leyes como la Ley General de Cambio Climático, la Política Nacional de Mares y Costas, y la Ley General de Protección Civil buscan proteger a las personas, el ambiente y el patrimonio cultural ante eventos adversos. La Ley General de Protección Civil define roles, responsabilidades y procedimientos para la prevención, preparación, respuesta y recuperación ante desastres (DOF, 2023).

Las Leyes Estatales incluyen la Constitución Política del Estado de Colima, la Ley de Protección Civil, la Ley de Planeación para el Desarrollo, y el Atlas de Peligros y Riesgos en el Estado de Colima (APREC). De estas derivan programas y reglamentos como el Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial y el Reglamento de Zonificación Estatal (Gobierno Municipal Manzanillo, 2024a; DOF, 2023).

A nivel Municipal, destacan el Plan de Acción Climática Municipal (PACMUN), el Reglamento de Protección Civil con enfoque en gestión integral de riesgos, el Programa de Desarrollo Urbano Municipal y el Programa Municipal de Ordenamiento Territorial (Gobierno Municipal Manzanillo, 2024b).

En la figura 8, se presenta el Marco Regulatorio y Legal a nivel nacional, estatal y municipal.

Factores climáticos y no climáticos

Los **factores climáticos** determinan las condiciones del lugar e incluyen latitud, altitud, relieve, corrientes marinas y circulación atmosférica (CREA, 2022; Molina, 1978). Manzanillo, un puerto costero vulnerable a huracanes, inundaciones y erosión, enfrenta riesgos agravados por la interacción de factores físicos, sociales y económicos. Estas amenazas, junto con la expansión urbana y la gestión territorial, afectan su capacidad de adaptación y resiliencia (CENAPRED, 2020).

Los **factores no climáticos**, vinculados a la actividad humana, aumentan la vulnerabilidad ante desastres naturales. Incluyen planeación urbana, infraestructura deficiente, pobreza, desigualdad social y políticas públicas inadecuadas.

En Manzanillo, integrar factores climáticos y no climáticos en el análisis de riesgos es clave para mejorar la prevención y respuesta ante fenómenos naturales. El cambio climático intensifica huracanes, lluvias extremas y la elevación del nivel del mar, aumentando los riesgos para las comunidades costeras. Sin embargo, problemas como el crecimiento urbano desordenado, pobreza e infraestructura in-



Figura 8. Marco Regulatorio y Legal para el Desarrollo Urbano y la Protección Civil en Manzanillo. Fuente: Elaboración propia

suficiente agravan la vulnerabilidad social y económica, limitando la capacidad de adaptación ante estos eventos (Comisión Europea, 2024).

Objetivos y metas para la reducción de vulnerabilidad

La UNDRR establece alianzas y aplica un enfoque global para reducir los desastres, con el objetivo de minimizar la pérdida de vidas, los efectos socioeconómicos y los daños ambientales. Para ello, propone cuatro objetivos clave:

- **Incrementar la conciencia pública** sobre el riesgo, vulnerabilidad y reducción de desastres.
- **Compromiso de las autoridades** para implementar políticas efectivas.
- **Fomentar alianzas interdisciplinarias e intersectoriales**, ampliando redes de colaboración.
- **Mejorar el conocimiento científico** en la reducción de riesgos (UNDRR, 2024).

La definición de los objetivos, metas y acciones para reducir la vulnerabilidad en Manzanillo se

basó en la integración de factores de riesgo, normativas vigentes y estrategias de adaptación climática. Se identificaron amenazas como huracanes, inundaciones y erosión costera, así como vulnerabilidades derivadas del crecimiento urbano desordenado y la infraestructura deficiente.

El análisis se alineó con la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), la Ley General de Protección Civil y las directrices de la UNDRR (2022). A partir de ello, se estructuraron acciones en seis ejes estratégicos, abordando infraestructura, protección ambiental, educación en riesgos, monitoreo, resiliencia socioeconómica y políticas de adaptación. La figura 9 resume este proceso metodológico y su aplicación en Manzanillo.

Metodología

En el marco del Manejo Integrado de la Zona Costera (MIZC) en Manzanillo, Colima se han implementado dos metodologías centrales para abordar los retos ambientales y promover un desarrollo



Figura 9. Modelo de los objetivos y metas para la reducción de la vulnerabilidad en Manzanillo. Fuente: Elaboración propia.

sostenible: el Modelo de Presión-Estado- Respuesta (FPEIR) y el Decálogo del MIZC (Barragán, 2012). Estas metodologías, al aplicarse conjuntamente, ofrecen un enfoque integral que facilita la planificación y gestión eficaz de los recursos costeros.

El modelo PER es un marco analítico utilizado para evaluar la interacción entre el ambiente y las actividades humanas. Este enfoque permite identificar los factores que impulsan los cambios

en el ecosistema, los impactos que generan, y las respuestas necesarias para mitigar dichos efectos, promoviendo la sostenibilidad (Kristensen, 2004).

Para el diagnóstico del MIZC en Manzanillo, se emplearon los lineamientos del Decálogo de Barragán, el cual aborda diez categorías: marco político, normatividad, competencias, instituciones, instrumentos estratégicos y operativos, recursos financieros, conocimiento e información, educación y sostenibilidad y participación comunitaria.

Resultados

Síntesis de la organización político-administrativa territorial de Manzanillo

Políticas actuales

Manzanillo cuenta con políticas públicas para regular el uso del suelo, el desarrollo urbano y la

protección ambiental. Estas buscan preservar ecosistemas críticos, como los manglares, y gestionar riesgos climáticos, especialmente en infraestructuras portuarias estratégicas. Entre las iniciativas locales destacan estrategias para reducir la contaminación portuaria y proteger la biodiversidad marina, mediante acuerdos locales e internacionales.



En la figura 10, se resumen las políticas más relevantes y las instituciones responsables de su implementación.

Conformación de la normatividad

El marco normativo y regulatorio en Manzanillo, Colima, busca proteger y conservar los recursos naturales costeros, promoviendo la preservación ambiental, el uso sostenible de recursos y la mitigación de los efectos del cambio climático (SEMARNAT, 2024).

El desarrollo urbano, industrial y portuario presenta desafíos específicos, impulsando la implementación de políticas y normativas para minimizar impactos negativos en el ecosistema (Gobierno del Estado de Colima, 2023; CONABIO, 2021). En la figura 11, se resumen las principales normativas vigentes para la gestión costera en Manzanillo.

Competencias

La gestión costera en Manzanillo requiere una coordinación interinstitucional que distribu-

ya eficazmente las competencias entre los niveles de gobierno y las instituciones responsables de la supervisión y conservación ambiental. Las principales competencias se distribuyen de la siguiente manera:

- **Gobierno Federal - SEMARNAT.** Supervisa el cumplimiento de normativas ambientales en áreas costeras, regulando actividades con impacto en los ecosistemas y colaborando con autoridades locales para garantizar la protección ambiental en operaciones costeras (SEMARNAT, 2024).
- **(Orden autónomo, con supervisión federal) - Administración Portuaria Integral (API).** Gestiona y opera el puerto de Manzanillo, monitoreando los impactos ambientales de las actividades portuarias. Colabora con SEMARNAT para implementar y supervisar medidas de conservación ambiental (API Manzanillo, 2021).
- **Gobierno Federal.** Define políticas nacionales y normativas ambientales aplicables a las regio-



Figura 10. Políticas relevantes para la zona costero- marina de Manzanillo.

Fuente: Elaboración propia



Figura 11. Normatividad actual de Manzanillo. Fuente: Elaboración propia.

nes costeras, incluido Manzanillo. Establece un marco regulatorio que facilita la implementación de programas para la preservación y el manejo costero (Gobierno de México, 2019).

- **Gobierno Estatal de Colima.** Mediante políticas locales y coordinación municipal, el gobierno estatal facilita el manejo costero en Manzanillo, promoviendo la conservación de ecosistemas y el cumplimiento de normativas ambientales (Gobierno del Estado de Colima, 2023).
- **Municipio de Manzanillo.** Implementa medidas de gestión costera, incluyendo restauración de ecosistemas y regulaciones para el uso del suelo urbano-costero, garantizando una respuesta eficaz a las necesidades locales (Gobierno del Estado de Colima, 2023).

Esta distribución de competencias facilita una respuesta coordinada a los desafíos ambientales, promoviendo políticas de conservación y desarrollo sostenible a nivel local y federal.

Instituciones y reparto de funciones

El manejo costero en Manzanillo es una tarea multidimensional que involucra a diversas instituciones gubernamentales y académicas, cada una con funciones específicas para la protección y sostenibilidad de los recursos costeros en la región. En la figura 12, se resumen las principales instituciones y su reparto de funciones para la gestión costera en Manzanillo.

La coordinación institucional es clave para enfrentar los desafíos ambientales en Manzanillo, implementando medidas sostenibles que protejan los recursos naturales y fortalezcan la resiliencia climática.

Instrumentos estratégicos y operativo

La gestión costera en Manzanillo se basa en instrumentos estratégicos y operativos que guían la conservación y el uso sostenible de los recursos naturales. Incluyen evaluaciones ambientales, sistemas de monitoreo y programas de ordenamiento

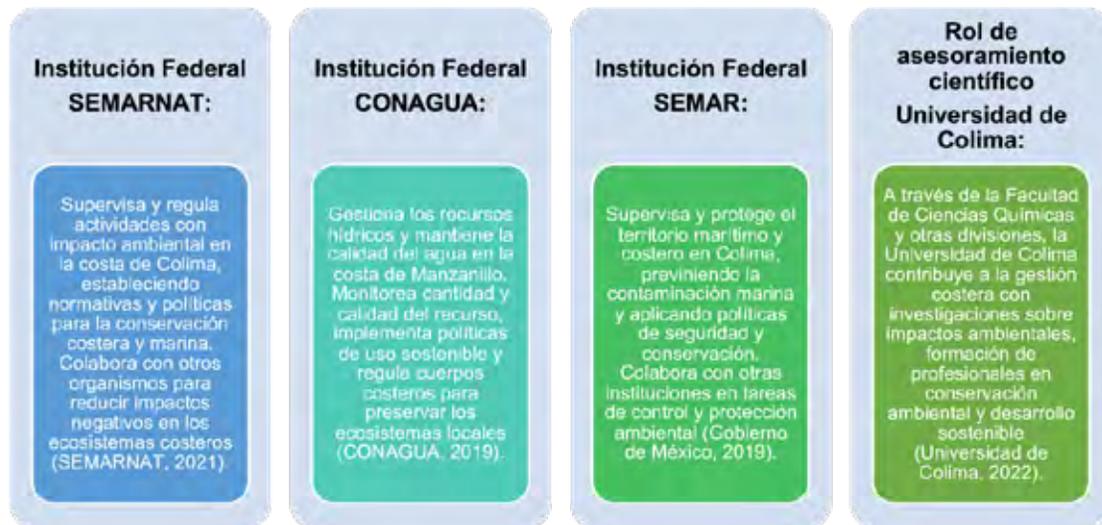


Figura 12. Instituciones y reparto de funciones en Manzanillo. Fuente: Elaboración propia.

ecológico (SEMARNAT, 2024). Además, se integran tecnologías de información geográfica y bases de datos ambientales, respaldando decisiones basadas en evidencia científica para una gestión costera efectiva y sostenible.

La tabla 4 detalla los principales instrumentos empleados en la región:

Formación y capacitación

La capacitación y formación de actores en la gestión costera son clave para implementar políticas ambientales y conservar los recursos naturales. En Manzanillo, se desarrollan programas y talleres para fortalecer las capacidades de funcionarios públicos, gestores ambientales y la comunidad local que contribuyen significativamente a la creación de una cultura de sostenibilidad y corresponsabilidad. Estas iniciativas abordan áreas como la protección de la biodiversidad, la evaluación de impactos ambientales y la mitigación de riesgos climáticos.

A continuación, se detallan las principales actividades de formación y capacitación en la región.

- **Programas de Capacitación para funcionarios Públicos, Gestores Ambientales y Comunidad Local.** Estos proporcionan herramientas importantes para la protección de los ecosistemas costeros, abarcando temas como

la biodiversidad, la evaluación de impactos ambientales y la gestión de riesgos climáticos (Gobierno del Estado de Colima, 2023; SEMARNAT, 2024).

- **Talleres de Gestión Ambiental para Personal Técnico y Tomadores de Decisiones.** Son dirigidos a personal técnico y tomadores de decisiones en la costa de Manzanillo, fortalecen sus conocimientos en gestión ambiental, facilitando la toma de decisiones informadas y sostenibles (Gobierno de México, 2019).
- **Capacitación en Manejo Costero Impartida por Instituciones Académicas.** La Universidad de Colima, a través de su Facultad de Ciencias Químicas, ofrece capacitación especializada en manejo costero, apoyando la formación de profesionales locales comprometidos con la sostenibilidad de la región (Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Colima, 2022).
- **Programas de Formación en Cambio Climático y Sostenibilidad para Líderes Comunitarios.** Estos están dirigidos a líderes comunitarios locales, con el objetivo de sensibilizarlos sobre la sostenibilidad y el cambio climático, promoviendo su participación en la gestión y conservación ambiental (INECC, 2019).



Tabla 4. Instrumentos en Manzanillo, Colima. Fuente: Elaboración propia.

| Instrumento | Nivel de competencia | Descripción |
|--|----------------------|--|
| Sistema de Monitoreo de Manglares | Federal | Evalúa la salud y restauración de manglares ante impactos ambientales (INECC, 2019). |
| Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) | Federal | Regula proyectos en zonas costeras para garantizar su compatibilidad ambiental (SEMARNAT, 2021). |
| Plan de Manejo Integral de la Zona Costera | Estatal | Estrategias para el uso sostenible y resiliente de los recursos costeros (Gobierno de Colima, 2023). |
| Sistema de Información Geográfica (SIG) | Estatal | Análisis espacial y planificación de ecosistemas costeros mediante datos georreferenciados (CONABIO, 2020) |
| Base de Datos Ambientales Regionales | Estatal | Información sobre biodiversidad y calidad ambiental para monitoreo continuo (INECC, 2019). |
| Programa de Educación y Conciencia Ambiental | Estatal | Sensibilización y capacitación en sostenibilidad para comunidades locales (SEMARNAT, 2021). |
| Plan de Ordenamiento Ecológico (POE) | Municipal | Regula el uso del suelo y la gestión ambiental en la costa de Manzanillo (Gobierno de Colima, 2023). |

Recursos económicos y financieros para el manejo costero

La asignación de recursos económicos es clave para el éxito de la gestión costera en Manzanillo. Los fondos provienen de financiamiento estatal y federal, destinados a la conservación de la biodiversidad y la restauración de ecosistemas, como los manglares. La inversión en infraestructura verde es fundamental, ya que estas soluciones naturales, a diferencia de la infraestructura gris, mitigan riesgos costeros como marejadas, inundaciones y erosión, al tiempo que mejoran la calidad del agua, preservan la biodiversidad y fomentan actividades sostenibles como la pesca y el ecoturismo. Además, colaboraciones con organizaciones internacionales apoyan proyectos específicos que refuerzan la resiliencia costera, asegurando una gestión sostenible de los recursos naturales y alineada con el Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC) (Gobierno de México, 2019; LGEEPA, 2018).

En la tabla 5 se describen los principales recursos económicos y financieros que respaldan la gestión costera en la región:

Conocimiento e información

El conocimiento científico y la información actualizada son esenciales para una gestión ambiental eficaz en Manzanillo. Estos insumos provienen de estudios de biodiversidad, mapeo de ecosistemas y análisis de riesgos, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones informadas (CONABIO, 2021). Este enfoque facilita el diseño de estrategias de conservación y adaptación basadas en datos.

- **Colaboración con Universidades y Centros de Investigación.** Las universidades y centros de investigación son clave para generar datos científicos rigurosos que fortalecen las políticas ambientales y guían acciones de conservación. La Universidad de Colima aporta información valiosa mediante estudios sobre impactos ambientales (SEMARNAT, 2024).
- **Monitoreo de la Calidad del Agua.** La Universidad de Colima realiza monitoreos periódicos de la calidad del agua en la costa de Manzanillo, evaluando la salud de los ecosistemas marinos y detectando fuentes de contaminación para implementar medidas correctivas



(Universidad de Colima & API Manzanillo, 2022).

- **Publicaciones Científicas sobre Biodiversidad Marina y Costera.** Estudios científicos en Colima han documentado la biodiversidad marina y costera, identificando especies en riesgo y medidas para su conservación. Estos trabajos respaldan la protección de la biodiversidad y orientan la gestión costera (INECC, 2023).
- **Proyectos de Ciencia Ciudadana.** La ciencia ciudadana involucra a la comunidad local en la recolección de datos ambientales, generando información sobre los ecosistemas costeros. Además, fortalece la conciencia ambiental y fomenta la corresponsabilidad en la conservación del entorno (Gobierno del Estado de Colima, 2020).
- **Mapeo de Ecosistemas y Análisis de Riesgos.** El uso de tecnologías avanzadas, como el mapeo con sistemas de información geográfica (SIG), permite caracterizar las zonas costeras e identificar áreas en riesgo, facilitando la anticipación y mitigación de impactos ambientales y climáticos (CONABIO, 2021).

La integración del conocimiento y monitoreo fortalece la respuesta ante desafíos ambientales en Manzanillo, facilitando una gestión costera adaptativa y basada en evidencia.

Educación para la sostenibilidad

La educación para la sostenibilidad en Manzanillo abarca desde la educación básica hasta la formación profesional, integrando la conciencia ambiental en los programas locales. Se enfoca en la protección de los manglares, la biodiversidad marina y la adaptación al cambio climático. A continuación, se describen las principales iniciativas educativas en la región. (figura 13).

Estas iniciativas educativas desempeñan un papel importante en la creación de una cultura de sostenibilidad en Manzanillo, formando ciudadanos y futuros líderes comprometidos con la protección del medio ambiente y la resiliencia frente al cambio climático.

Participación ciudadana

La participación ciudadana es clave para el éxito de la gestión ambiental en Manzanillo, asegurando que las políticas reflejen las necesidades locales. Incluir a la comunidad en la toma de decisiones fortalece la corresponsabilidad y promueve una gestión efectiva y sostenible de los recursos costeros. A continuación, se detallan las principales actividades de participación ciudadana en la región.

- **Consultas Públicas y Comités Ciudadanos.**

A través de consultas públicas y comités ciudadanos, el gobierno local involucra a la comuni-

Tabla 5. Recursos económicos y financieros para el manejo costero. Fuente: Elaboración propia.

| Recurso | Descripción |
|---|--|
| Fondos de Cooperación Internacional | Apoyo financiero para sostenibilidad costera y adaptación climática (BID, 2015). |
| Presupuesto Estatal para la Conservación | Fondos para restauración de ecosistemas costeros en Colima (Gobierno de Colima, 2023). |
| Fondos Federales para la Adaptación Climática | Financiamiento para resiliencia y mitigación en zonas costeras (Gobierno de México, 2019). |
| Banco Interamericano de Desarrollo (BID) | Financiamiento para infraestructura y adaptación en el puerto de Manzanillo (BID, 2015). |
| Fondos de Conservación y Desarrollo Sustentable | Recursos para infraestructura verde y áreas protegidas (CONABIO, 2020). |
| Incentivos Fiscales para Proyectos Ambientales | Beneficios fiscales para inversiones en conservación costera (SEMARNAT, 2021). |



dad en la planificación y gestión de proyectos de conservación, fomentando la participación social y una cultura de corresponsabilidad en la protección de los ecosistemas costeros (Gobierno del Estado de Colima, 2023; Gobierno de México, 2019).

• **Desafíos en la participación ciudadana en la gestión costera.** Aunque Manzanillo cuenta con iniciativas de participación ciudadana en temas ambientales, la gestión costera sigue siendo un proceso dominado por actores gubernamentales y empresariales (Hernández-López *et al.*, 2020). La comunidad local enfrenta barreras para involucrarse activamente en la toma de decisiones debido a:

- Escasos espacios de diálogo y colaboración con autoridades (Hernández *et al.*, 2020).
- Procesos burocráticos que limitan la participación de comunidades pesqueras y rurales (OECD, 2023).

Para fortalecer la participación ciudadana en el manejo costero, se propone:

- Desarrollar programas de educación ambiental dirigidos a comunidades locales (INECC, 2023).

- Crear mecanismos de participación digital que faciliten el acceso a información y la retroalimentación en la toma de decisiones (Gobierno del Estado de Colima, 2023).

- Incluir representantes comunitarios en los comités de gobernanza costera (UNDRR, 2024).

- **Consejos Consultivos Locales para la Toma de Decisiones Ambientales.** La creación de consejos consultivos locales facilita la participación ciudadana en la toma de decisiones ambientales, garantizando políticas adaptadas al contexto y las prioridades de la comunidad.

- **Proyectos Colaborativos para la Restauración de Ecosistemas.** La comunidad participa en proyectos colaborativos para la restauración de playas y manglares, fomentando una recuperación activa y consciente de los recursos naturales y fortaleciendo el compromiso con la conservación (Gobierno del Estado de Colima, 2020).

- **Foros Públicos sobre Temas Ambientales y Desarrollo Costero:** Los foros públicos, organizados por el gobierno local, permiten la consulta y retroalimentación en temas ambientales



Figura 13. Iniciativas educativas en Manzanillo. Fuente: Elaboración propia.



y de desarrollo costero, facilitando el diálogo comunidad-gobierno para una gestión costera inclusiva y eficaz (INEC2023; Gobierno del Estado de Colima, 2020).

La participación comunitaria fortalece la gestión ambiental y fomenta una cultura de sostenibilidad en Manzanillo, esencial para la preservación a largo plazo de los ecosistemas costeros.

Economía azul

La economía azul en Manzanillo representa una oportunidad clave para el desarrollo sostenible, gracias a su posición estratégica como puerto relevante en el Pacífico mexicano (API Manzanillo, 2021). Se basa en el aprovechamiento sostenible de los recursos oceánicos y costeros, impulsando actividades como pesca sostenible, acuicultura y turismo ecológico (SEMARNAT, 2024). La diversificación económica, integrando sectores como la energía renovable y la biotecnología marina, no solo puede aumentar el PIB local, sino también generar empleos en sectores emergentes (INEGI, 2020).

El fortalecimiento de la economía azul podría reducir la presión sobre los ecosistemas de manglares y arrecifes, que actualmente enfrentan amenazas debido al cambio climático y al desarrollo urbano, ya que son fundamentales para la protección costera y la biodiversidad, y su conservación es importante para una economía costera resiliente (SCT, 2020). Asimismo, la implementación de políticas públicas que incentiven prácticas sostenibles en el sector marítimo y portuario contribuiría a una mayor competitividad de Manzanillo en mercados internacionales que demandan altos estándares ambientales (API Manzanillo, 2021).

Integración de la Economía Azul en el Manejo Costero

La economía azul ofrece una oportunidad clave para mejorar el manejo costero en Manzanillo mediante estrategias que vinculen la conservación de los ecosistemas con el desarrollo económico sostenible. Sin embargo, actualmente estas estrategias se presentan de manera aislada y no forman parte

de una visión integral de gestión costera (OECD, 2023).

Para fortalecer la integración de la economía azul en el MIZC, se sugiere:

- Incorporar criterios de sostenibilidad en las políticas de inversión portuaria (API Manzanillo, 2021).
- Implementar esquemas de financiamiento para emprendimientos de pesca sostenible y ecoturismo (FAO, 2021).
- Incentivar la diversificación productiva con base en principios de economía circular, reduciendo la presión sobre los ecosistemas costeros (Rodríguez & Silva, 2019).

Un caso exitoso de integración de la economía azul en el manejo costero es el desarrollo de proyectos de restauración de arrecifes artificiales, que no solo fomentan la biodiversidad, sino que también impulsan actividades turísticas de bajo impacto ambiental (PNUMA, 2022).

Perspectivas y Retos de la Economía Azul en Manzanillo, Colima

La economía azul en Manzanillo ofrece ejemplos prácticos que pueden fortalecer su desarrollo sostenible (tabla 6). Estos ejemplos incluyen:

Innovaciones en:

- Café y hongos utilizados para producir biocombustible (Santos *et al.*, 2021).
- Cáscara de naranja para fabricación de jabones biodegradables, promoviendo una economía circular (García & López, 2020).
- Biocombustibles a partir de algas y pastos marinos, que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y evitan la competencia por espacio en tierra (Li & Yao, 2024).
- Conversión de Energía Térmica Oceánica (OETC), utilizando gradientes salinos, corrientes y mareas para capturar energía hidráulica (Thennakoon *et al.*, 2023)).
- Hidrógeno en el sector marítimo como fuente de combustible, contribuyendo a la descarbonización del transporte (Zhou & Tao, 2025).



Capacidad para adaptarnos:

- Reconocimiento de contextos locales y regionales para fortalecer la economía azul (API Manzanillo, 2021).
- Fortalecimiento de capacidades a nivel local, regional y nacional en prácticas sostenibles.
- Adaptación, innovación e inversión pública y privada como impulsores de la economía azul.
- Colaboración intersectorial basada en la cooperación entre ciencia e industria, apoyada en Big Data e inteligencia artificial para la toma de decisiones.
- Balance entre oportunidades de producción y beneficios sociales y ambientales.
- Promoción de la cooperación, adaptación, equidad, inversión, innovación y responsabilidad eco-social.

Océanos sostenibles:

- Reflexión sobre la necesidad de un océano sostenible para mitigar riesgos e incertidumbres mediante información, innovación, inversión y planeación (INEGI, 2020).
- Cambio de visión, fomentando la cooperación y coordinación, aumentando capacidades.
- Evaluación de la factibilidad de los flujos de producción y los costos de oportunidad de no tomar medidas.
- Necesidad de liderazgo para promover cambios y replicar casos de éxito.
- Evaluación de beneficios de acciones de adaptación y de los costos de oportunidad de no actuar (Secretaría de Comunicaciones y Transportes, 2020).

Tabla 6. Perspectivas y retos de economía azul en Manzanillo, Colima. Fuente: Elaboración propia.

| Perspectivas | Retos |
|--|---|
| Diversificación económica: Expansión de pesca responsable, ecoturismo y energías renovables (API Manzanillo, 2022). | Conflictos de uso de recursos: Competencia entre actividades tradicionales y sostenibles (SEMARNAT, 2018). |
| Turismo sostenible: Oportunidades en ecoturismo y recreación marina no invasiva (SCT, 2020). | Contaminación y degradación ambiental: Impacto de la contaminación marítima en la biodiversidad (INEGI, 2020). |
| Acuicultura y pesca sostenible: Proyectos ecológicos para empleo y conservación de especies (SEMARNAT, 2018). | capacitación y educación: Falta de formación en prácticas sostenibles y educación ambiental (API Manzanillo, 2022). |
| Energías Renovables Marinas: Desarrollo de energía eólica y undimotriz para reducir uso de combustibles fósiles (SCT, 2020). | Infraestructura y financiamiento: Altos costos iniciales para proyectos sostenibles (SEMARNAT, 2018). |
| Conservación de ecosistemas marinos: Creación de áreas protegidas y restauración de manglares (SEMARNAT, 2018). | Cambio climático y vulnerabilidad: Aumento del nivel del mar y eventos extremos (INEGI, 2020). |



Figura 14. Economía azul en Manzanillo, Colima. Fuente: Elaboración propia.

Discusión

El Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC) en Manzanillo, Colima, ejemplifica un modelo de gestión clave que incorpora la conservación ambiental y el desarrollo económico sostenible en un marco participativo y adaptativo. Ha sido ampliamente adoptado en zonas costeras de alto valor ecológico, como Australia y el Caribe, donde ha demostrado reducir la degradación ambiental y fortalecer la resiliencia económica (PNUMA, 2022). Al aplicar un enfoque coordinado, como el modelo Presión-Estado-Respuesta (PER), el MIZC en Manzanillo facilita una planificación costera eficaz, equilibrando conservación y desarrollo en línea con estándares de sostenibilidad internacionales.

Su implementación ofrece beneficios clave, como la mitigación del cambio climático, la protección de manglares y la mejora en la calidad de vida de las comunidades. Estas medidas no solo benefician a la población actual, sino que generan un legado de resiliencia a largo plazo. Sin embargo, su efectividad depende de la coordinación interinstitucional, fi-

nanciamiento estable y voluntad política (INECC, 2023). En otras regiones de México, como Veracruz y Quintana Roo, su adopción ha favorecido la recuperación de ecosistemas y mayor cohesión social, validando la eficacia del modelo (CONABIO, 2021; SEMARNAT, 2024).

Sin el MIZC, Manzanillo enfrentaría mayor degradación costera, afectando su economía y aumentando la vulnerabilidad ante fenómenos extremos (Cervantes *et al.*, 2023). La erosión costera, pérdida de biodiversidad y falta de planificación limitarían inversiones en turismo sostenible y pesca responsable (API Manzanillo, 2022).

Implementar el MIZC fortalecería la resiliencia de Manzanillo y serviría como modelo replicable. Para su éxito, es clave superar la fragmentación en la toma de decisiones y fortalecer la educación ambiental, involucrando a la comunidad en la conservación de los recursos costeros (SEMARNAT, 2024).



Conclusiones

El Manejo Integrado de Zonas Costeras (MIZC) en Manzanillo es clave para el desarrollo sostenible y la resiliencia ambiental. La explotación desmedida de recursos y la falta de políticas de gobernanza aumentan la vulnerabilidad de comunidades y ecosistemas ante amenazas como el aumento del nivel del mar.

Este estudio destaca la importancia de integrar herramientas analíticas en la planificación del MIZC. El análisis de riesgo y costo-beneficio permite identificar amenazas y priorizar medidas de adaptación viables. Su aplicación ha fortalecido la gestión territorial y del riesgo, además de impulsar la economía azul, promoviendo pesca responsable, ecoturismo y restauración de ecosistemas.

Los hallazgos de este diagnóstico representan un insumo clave para la construcción del Plan de Manejo Costero de Manzanillo, asegurando estrategias más resilientes, sostenibles y basadas en evidencia científica.

La implementación del MIZC no solo protege los recursos naturales y fortalece la resiliencia comunitaria, sino que también puede servir como modelo replicable en otras regiones con desafíos ambientales similares. Integrar la economía azul generará oportunidades económicas a partir de la conservación y uso sostenible de los ecosistemas marino-costeros. Para su éxito, se recomienda fortalecer el marco normativo y capacitar a actores clave, garantizando la sostenibilidad de las medidas y su adaptación a los cambios ambientales futuros.

Referencias

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16: 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Amaya Molinar, C. M., Conde Pérez, E. M., Covarrubias Ramírez, R. (2018). La competitividad turística: imperativo para Manzanillo, Colima. Universidad de Colima.
- Antúnez, P. (2024). Mangrove Area Trends in Mexico Due to Anthropogenic Activities: A Synthesis of Five Decades (1970–2020). *Coasts*, 4(4): 726–739. <https://doi.org/10.3390/coasts4040038>
- Appendini, C. M., Meza-Padilla, R., Abud-Russell, S., Proust, S., Barrios, R. E., Secaira-Fajardo, F. (2019). Effect of climate change over landfalling hurricanes at the Yucatán Peninsula. *Climatic Change*, 157(3): 469–482. <https://doi.org/10.1007/s10584-019-02569-5>
- API Manzanillo. (2021). Puerto de Manzanillo: gestión de riesgos climáticos
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2023). Beneficios económicos y ambientales de la restauración de manglares en zonas costeras.
- Barragán, J. M. (2012). Manejo Costero Integrado y Desarrollo Sostenible: una aproximación desde Iberoamérica. Universidad de Cádiz. Red IBERMAR (CYTED), Cádiz, 152
- Beck, M. W., Lange, G.-M. (Eds.). (2016). *Managing Coasts with Natural Solutions: Guidelines for Measuring and Valuing the Coastal Protection Services of Mangroves and Coral Reefs*. World Bank.
- CENAPRED. (2020). Atlas Nacional de Riesgos. Recuperado de <https://www.atlasmnacionalderiesgos.gob.mx>
- Cervantes, O., Pérez-Montero, O., Velázquez-Labrada, Y. (2023). Manejo Integrado de Zonas Costeras y la Agenda 2030: experiencias desde la Universidad de Oriente, Cuba. En O. Pérez-Montero *et al.* (Eds.), *Manejo Integrado de Zonas Costeras y la Agenda 2030* (pp. 188–221). Universidad de Oriente.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en los acuíferos costeros cercanos a Manzanillo, Colima. SIGA-GIS, México. https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/colima/DR_0608.pdf
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2021). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales (en Capital natural de México, Vol. I). México: CONABIO. https://www2.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/CapNatMex/Vol%20I/I04_Losecosistemascos.pdf
- CONEVAL. (2024). Pobreza y marginación en Manzanillo, Colima. <https://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Colima/Paginas/principal.aspx>
- Consejo Nacional de Población (CONAPO). (2021). Condiciones socioeconómicas y ambientales en los municipios con alta vulnerabilidad demográfica y ambiental (Índice de marginación y cambio climático). México: CONAPO.
- Cruz Salas, A. A., Vázquez, A., Álvarez Zeferino, J. C. (2020). Relación de la calidad ambiental y la presencia de resi-



- duos sólidos y microplásticos en cinco playas (México). https://www.researchgate.net/publication/374947020_Presencia_de_residuos_solidos_en_playas_de_arena_datos_para_entender_la_situacion
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2023). Ley General de Protección Civil en México.
- EcologíaVerde. (2023, 1 de diciembre). Elementos y factores del clima. EcologíaVerde. <https://www.ecologiaverde.com/elementos-y-factores-del-clima-3167.html>
- Sol-Sánchez, A., Hernández-Melchor, G. I., Hernández-Hernández, M. (2022). Desarrollo bioeconómico y manglares en América Latina. *Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático*, 8(16), 2007–2017. <https://doi.org/10.5377/ribcc.v8i16.15162>
- Estrada, F., Mendoza-Ponce, A., Calderón-Bustamante, O., Botzen, W. (2022). Impacts and economic costs of climate change on Mexican agriculture. *Regional Environmental Change*. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01986-0>
- European Court of Auditors. (2024). Special Report No 15/2024: Adaptation to climate change in the EU – the Commission's support is helping, but stronger delivery on the ground is needed. Publications Office of the European Union. https://www.eca.europa.eu/ECAPublications/SR-2024-15/SR-2024-15_EN.pdf
- Gobierno de Colima. (2021). Planeación y ordenamiento urbano en Manzanillo. <https://pmotdum.inplanmanzanillo.com/>
- Gobierno de México. (2019). Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024. <https://www.gob.mx/agricultura/documentos/plan-nacional-de-desarrollo-gobierno-de-mexico-2019-2024>
- Gobierno de México. (2022). Programa de Ecología Regional (PER): Estrategias y resultados. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/828742/Informe_Avanace_y_Resultados_2022.pdf
- Gobierno Municipal de Manzanillo. (2024a). Marco regulatorio y legal para la gestión de riesgos. <https://transparencia.manzanillo.gob.mx/articulo/29/1/fraccion/detalle>
- Gobierno Municipal de Manzanillo. (2024b). Informe demográfico y socioeconómico del municipio de Manzanillo. <https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/geo/manzanillo?redirect=true>
- Goldberg, J. P., Tavares, M. V., Costa, T. M., Costa, M. F., Lana, P. C. (2020). Relevance and feasibility of mangrove insurance in Mexico, Florida, and Jamaica. The Nature Conservancy. <https://www.tncmx.org/content/dam/tnc/nature/en/documents/mexico/Relevancia-y-viabilidad-de-un-seguro-de-manglares.pdf>
- Hernández-López, J., Cervantes, O., Olivos-Ortiz, A., & Guzmán-Reyna, R. R. (2020). DSPIR Framework as Planning and Management Tools for the La Boquita Coastal System, Manzanillo, Mexico. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(8), 615. <https://doi.org/10.3390/jmse8080615>
- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). (2023). Jornada Estatal contra el Cambio Climático, Estado de Colima, 15–16 de junio 2023: diagnóstico y propuestas para territorios costeros [Informe]. INECC. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/961852/021_2024Colima.pdf
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). Anuario Estadístico y Geográfico de Colima 2020. México: INEGI. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463610540>
- IPCC. (2022). Cambio climático 2022: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de Trabajo II al Sexto Informe de Evaluación del IPCC.
- Kristensen, P. (2004). The DPSIR Framework. En UNEP Workshop on Vulnerability of Water Resources to Environmental Change: A River Basin Approach (pp. 1–15). UNEP, Nairobi, 27–29 September 2004. https://fis.freshwatertools.eu/files/MARS_resources/Info_lib/Kristensen%282004%29DPSIR%20Framework.pdf
- Li, G., Yao, J. (2024). A Review of Algae-Based Carbon Capture, Utilization, and Storage (Algae-Based CCUS). *Gases*, 4(4): 468–503. <https://doi.org/10.3390/gases4040024>
- Lin, Z., & Singh, M. (2024). Assessing coastal vulnerability and evaluating the effectiveness of natural habitats in enhancing coastal resilience: A case study in Shanghai, China. *Journal of Marine Science and Engineering*, 12(3): 386. <https://doi.org/10.3390/jmse12030386>
- Narayan, S., Beck, M.W., Wilson, P., Thomas, C., Guerrero, A., Shepard, C., Reguero, B.G., Franco, G., Ingram, C.J., Trespalacios, D. (2016). Coastal Wetlands and Flood Damage Reduction: Using Risk Industry-based Models to Assess Natural Defenses in the Northeastern USA. Lloyd's Tercentenary Research Foundation, London.
- National Hurricane Center & Central Pacific Hurricane Center. (2016). Tropical Cyclone Report: Hurricane Patricia (EP202015). NOAA. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/EP202015_Patricia.pdf
- OCDE. (2021). Respuestas al aumento del nivel del mar: Enfoques de los países de la OCDE para abordar los riesgos costeros. OECD Publishing.
- OECD. (2003). Pressures on ecosystems and natural resources. OECD Environmental.
- Oceana México. (2024). Decálogo para transformar la pesca en México. Oceana. <https://mx.oceana.org/wp-content/uploads/sites/17/2024/12/decalogo-web.pdf>
- OECD. (2003). Pressures on ecosystems and natural resources. OECD Environmental Outlook.
- Pang, T., Wang, X., Nawaz, R. A., Keefe, G., Adekanmbi, T. (2023). Coastal erosion and climate change: A review on coastal-change process and modeling. *Ambio*, 52(12): 2034–2052. <https://doi.org/10.1007/s13280-023-01901-9>
- PNUMA. (2022). Informe sobre la brecha de adaptación 2022: Muy poco, demasiado lento – El fracaso de la adaptación climática pone al mundo en riesgo. <https://www.unep.org/es/resources/informe-sobre-la-brecha-de-adaptacion-2022>
- Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA). (2016). ¿Qué es la Zona Federal Marítimo Terrestre?



- tre? <https://www.gob.mx/profepa/acciones-y-programas/que-es-la-zona-federal-maritimo-terrestre-56672>
- Rincón-Quintero, Y. (2013). Comunicación corporativa, relaciones públicas y logística en la Dinámica Organizacional. Encuentros en Comunicación, Relaciones Públicas y Logística, Universidad Autónoma del Caribe, 12 (1), 47-59. <https://www.redalyc.org/pdf/4766/476655657003.pdf>
- Rivera-Arriaga, E., Villalobos-Zapata, G. J. (2012). El manejo integrado de la zona costera en México: Un diagnóstico. *Ocean & Coastal Management*, 66: 38–48.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2024). Avance y resultados sectorial 2023-2024: Conservación, restauración y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales (Programa Sectorial de Medio Ambiente y Recursos Naturales 2020–2024, PROMARNAT). Ciudad de México: SEMARNAT.
- Secretaría de Turismo (SECTUR). (2023). Sexto Informe de Labores 2023–2024: Turismo en México. Gobierno de México.
- Seddon, N., Chausson, A., Berry, P., Girardin, C., Smith, A., Turner, B. (2020). Understanding the value and limits of nature-based solutions to climate change and other global challenges. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 375(1794): 20190120. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2019.0120>
- Siyum, Z. G. (2020). Tropical dry forest dynamics in the context of climate change: syntheses of drivers, gaps, and management perspectives. *Ecological Processes*, 9(1): 25. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00229-6>
- Souter, D., Planes, S., Wicquart, J., Logan, M., Obura, D., Staub, F. (Eds.). (2021). Status of Coral Reefs of the World: 2020. Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN) / International Coral Reef Initiative (ICRI). <https://gcrmn.net/wp-content/uploads/2023/01/Status-of-Coral-Reefs-of-the-World-2020-Full-Report.pdf>
- Spalding, M. D., McIvor, A. L., Beck, M. W., Koch, E. W., Möller, I., Reed, D. J., Rubinoff, P., Spencer, T., Tolhurst, T. J., Wamsley, T. V., van Wesenbeeck, B. K., Wolanski, E., & Woodroffe, C. D. (2014). Coastal ecosystems: A critical element of risk reduction. *Conservation Letters*, 7(3): 293-301. <https://doi.org/10.1111/conl.12074>
- Thennakoon, L. K., Witharana, S., Meegahapola, L. (2023). Harnessing the Power of Ocean Energy: A Comprehensive Review. *Journal of Research in Technology & Engineering*, 4(3), 73–102.
- United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2024). Marco conceptual para la reducción del riesgo de desastres. <https://www.undrr.org/annual-report/2024>
- Universidad de Colima & Administración Portuaria Integral de Manzanillo. (2022). Seguimiento ambiental Puerto de Manzanillo: calidad del agua — parámetros físico-químicos y microbiológicos, enero–julio 2022 [Informe técnico]. <https://www.puertomanzanillo.com.mx/upl/sec/2023/CALIDAD-DEL-AGUA-PAR%C3%81METROS-F%C3%8DSICO-QU%C3%8DMICOS-JULIO-2022.pdf>
- Valdez-Moreno, G., Schaaf, P., Macías, J. L. (2006). New Sr–Nd–Pb–O isotope data for Colima volcano and evidence for the nature of the local basement. Neogene-Quaternary Continental Margin Volcanism: A perspective from México, Siebe, C., Macías, J., Aguirre-Díaz G.
- Zhou, Z., Tao, J. (2025). Hydrogen-powered vessels in green maritime decarbonization: Policy drivers, technological frontiers and challenges. *Frontiers in Marine Science*, 12, 1601617. <https://doi.org/10.3389/fmars.2025.1601617>

Noh-Medina, J.A., Borges-Ramírez, M.M., Sandoval-Gio, J.J., Peregrina-Lucano, A., Helguera, E., Arellano-Aguilar, O., Rendón-von Osten, J. 2025. Glifosato en Tizimín: agricultura y apicultura. JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático 7(1): 55-66. doi 10.26359/52462.0704



Glifosato en Tizimín: agricultura y apicultura

Glyphosate in Tizimín: Agriculture and Beekeeping

*José A. Noh-Medina¹, Merle M. Borges-Ramírez², Juan J. Sandoval-Gio¹,
Aaron Peregrina-Lucano³, Emmanuel Helguera³, Omar Arellano-Aguilar⁴
y Jaime Rendón-von Osten^{2*}*

¹Instituto Tecnológico de Tizimín, Tizimín, Yucatán, México.

²Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX),
Universidad Autónoma de Campeche

³Departamento de Salud Pública, Universidad de Guadalajara,

⁴Escuela Nacional de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México

* autor de correspondencia: jarendon@uacam.mx

doi 10.26359/52462.0704

Recibido 04/junio/2024. Aceptado 1/julio /2025

JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático

Coordinación editorial de este número: Yassir E. Torres Rojas

Este es un artículo bajo licencia Creative Commons CC BY-NC-ND.



Resumen

El uso de agrotóxicos en la agricultura puede contaminar el ambiente y generar efectos indeseables en el ser humano y en la vida silvestre. El caso del herbicida glifosato (GLY), es emblemático actualmente ya que es el agroquímico más empleado en todo el mundo, por lo que se ha detectado este compuesto en aguas superficiales y subterráneas, aire, suelo, alimentos y organismos. En el municipio de Tizimín, Yucatán se encontraron residuos de GLY y AMPA en aguas procedentes de las localidades de Kabichén (GLY: 3.9 ± 3.8 $\mu\text{g/L}$ y AMPA: 4.8 ± 2.8 $\mu\text{g/L}$) y Dzonot Carretero (GLY: 3.5 ± 3.7 $\mu\text{g/L}$ y AMPA: 4.3 ± 3.0 $\mu\text{g/L}$). Respecto a las concentraciones en suelos, únicamente se hallaron en la localidad de Kabichén (GLY: 2.3 ± 2.6 $\mu\text{g/kg}$ y AMPA: 26.5 ± 68.1 $\mu\text{g/kg}$). En otra localidad del municipio de Tizimín, San Luis Tzuk-Tuk, también se detectó la presencia de GLY en concentraciones de 0.12 a 0.38 $\mu\text{g/L}$. En Tizimín, la agricultura de maíz y soya es muy importante, no obstante, a pesar de que la apicultura es una actividad secundaria, su relevancia radica en la producción de miel y en el proceso de polinización. De tal manera que la agricultura y la apicultura tienen una relación indiscutible, pues ambas actividades han estado ligadas por siglos en la producción de alimentos. Sin embargo, los avances tecnológicos dieron paso a que los campos de cultivo aumentaran de tamaño principalmente debido a los beneficios económicos, en contraposición a ello, las abejas y productos que generan han sido afectados por la pérdida de bosques y uso de agrotóxicos. De tal manera que los plaguicidas han originado la pérdida de los polinizadores como las abejas y la baja en la actividad apícola. En específico, el GLY influye de manera negativa en los procesos de aprendizaje asociativo de las abejas trabajadoras, así como en las habilidades cognitivas y sensoriales de las abejas más jóvenes en la colmena y retrasa el desarrollo de las larvas. Es importante resaltar que las abejas polinizan el 75% de los cultivos alimentarios del planeta, por lo que la protección de las abejas es vital para nuestra seguridad alimentaria y conservación de la biodiversidad.

Palabras clave: glifosato, Tizimín, agricultura apicultura.

Abstract

The use of agrochemicals in agriculture can contaminate the environment and generate undesirable effects on humans and wildlife. The case of the herbicide glyphosate (GLY) is emblematic today, as it is the most widely used agrochemical worldwide. This compound has been found in surface and groundwater, air, soil, food, and organisms. In the municipality of Tizimín, Yucatán, residues of GLY and AMPA were found in water from the localities of Kabichén (GLY: 3.9 ± 3.8 $\mu\text{g/L}$ and AMPA: 4.8 ± 2.8 $\mu\text{g/L}$) and Dzonot Carretero (GLY: 3.5 ± 3.7 $\mu\text{g/L}$ and AMPA: 4.3 ± 3.0 $\mu\text{g/L}$). Regarding soil concentrations, GLY was found only in the town of Kabichén (GLY: 2.3 ± 2.6 $\mu\text{g/kg}$ and AMPA: 26.5 ± 68.1 $\mu\text{g/kg}$). In another locality in Tizimín, San Luis Tzuk-Tuk, the presence of GLY was also detected at concentrations of 0.12 to 0.38 $\mu\text{g/L}$. Corn and soybean farming are very important in Tizimín; however, although beekeeping is a secondary activity, its importance lies in honey production and the pollination process. Thus, agriculture and beekeeping have an indisputable relationship, since both activities have been linked for centuries in food production. However, technological advances have led to increased crop size, primarily due to economic benefits. However, bees and the products they generate have been affected by forest loss and the use of agrochemicals. Pesticides have led to the loss of pollinators such as bees and a decline in beekeeping activity. Specifically, GLY negatively influences the associative learning processes of worker bees, as well as the cognitive and sensory abilities of younger bees in the hive, and delays larval development. It is important to note that bees pollinate 75% of the planet's food crops, so protecting bees is vital for our food security and biodiversity conservation.

Keywords: Glyphosate, Tizimín, agriculture, beekeeping.



Introducción

El glifosato (GLY; N-(fosfometil) glicina) es un herbicida no selectivo que actúa inhibiendo una enzima que se encuentra en las rutas biosintéticas de aminoácidos aromáticos en las plantas. Este herbicida fue patentado en 1974 y ha sido aprobado para diversos grupos agrícolas (Székács y Darvas, 2012). El GLY presenta una alta solubilidad en agua, y puede adherirse al suelo dependiendo del contenido de fosfato, el pH, la materia orgánica, las condiciones redox del suelo y la composición microbiana (Okada *et al.*, 2019; Carretta *et al.*, 2021). Dependiendo del tipo de suelo, y de las variables mencionadas la vida media del GLY puede ser de 60 a 214 días aproximadamente (Bergström *et al.*, 2011). El AMPA (ácido aminometilfosfónico) es el principal producto de degradación del GLY, el cual puede ser más tóxico que la molécula parental.

El uso agrícola mundial del GLY tuvo un crecimiento exponencial tras la adopción de los cultivos transgénicos resistentes al herbicida en 1996. De tal manera que actualmente las semillas transgénicas resistentes a este herbicida son de algodón, soya, maíz, canola, alfalfa y sorgo. En 2018, Estados Unidos se posicionó como el principal consumidor de GLY, utilizando cerca de 130 millones de kilogramos aplicados (Duke *et al.*, 2018). En 2023 las ventas anuales de glifosato en el mundo fueron de 6.21 mil millones de dólares (MMUSD), de los cuales los cultivos GM tuvieron una venta de 2.98 MMUSD de glifosato y se espera que en 2032 llegue a 4.72 MMUSD (<https://www.gminsights.com/es/industry-analysis/glyphosate-market>).

Las comunidades rurales en México dependen de la agricultura para su sustento. No obstante, la agricultura tradicional ha ido cambiando hacia un modelo agroindustrial que se caracteriza por el uso de maquinarias, agroquímicos y productos genéticamente modificados para incrementar el rendimiento de las cosechas, así como el uso extensivo de glifosato y otros plaguicidas (Mardero *et al.*, 2018).

La plantación de soya, principalmente transgénica, en el sureste y sur de Yucatán junto con la aplicación de GLY, conlleva serios peligros para la salud humana y provoca la contaminación de acuíferos, debido a la rápida infiltración de contaminantes en el suelo kárstico (SEDUMA, 2012). En Yucatán, la tala de bosques y la degradación de la tierra son en gran parte atribuibles a los cultivos transgénicos de soya y maíz, así como a la cría de ganado a gran escala (Ramírez *et al.*, 2023). En el año 2017, la producción de soya en Yucatán superó las 25 000 toneladas, lo que representó un aumento del 25 % en comparación con el año 2016. Además, la superficie dedicada al cultivo de soya en la región creció un 33% respecto al año anterior, pasando de 8 000 a 12 000 hectáreas cultivadas. Durante 2017, se distribuyeron 130 toneladas de semillas de soya a 13 000 agricultores de diversas localidades del estado de Yucatán, incluyendo Tizimin (Polanco-Rodríguez y Araujo-León, 2018).

El maíz y la soya transgénica afectan de manera desfavorable los recursos naturales esenciales para la supervivencia de la apicultura, debido a la tala de árboles, la producción agrícola uniforme y la aplicación de grandes cantidades de plaguicidas (Ricroch *et al.*, 2018). La apicultura en México es una actividad económica importante con una producción promedio de 57 000 toneladas de miel al año (Zúñiga-Díaz *et al.*, 2024). México se sitúa como el quinto productor de miel a nivel mundial y el cuarto en exportaciones de miel (Soto-Muciño *et al.*, 2015). En 2015, las exportaciones de miel representaron el 65% de la producción total. La apicultura representa una actividad clave que realiza la población para obtener productos como la miel y la cera, que cuentan con múltiples usos que van desde el alimenticio hasta el industrial. Sin embargo, la drástica reducción en la cantidad de abejas melíferas en el mundo y en México se ha visto forzada por la pérdida de sus hábitats, por la contaminación de los ecosistemas y por el uso indiscriminado de agroquímicos en la agricultura (Tamariz, 2013).



Los grandes volúmenes de glifosato en zonas agrícolas ocasionan la acumulación de residuos en los suelos, lo que representa un riesgo de contaminación tanto para el medio ambiente como para la salud humana a través de los alimentos (Meftaul *et al.*, 2020). Varios estudios han demostrado que el uso de glifosato puede perjudicar a organismos no objetivos tales como las abejas. Un ejemplo de esto es la investigación realizada por Motta *et al.* (2018), que mostró que la exposición de las abejas al glifosato puede alterar su microbiota intestinal, lo que afecta la salud de las abejas y su papel como polinizadores.

Además, el GLY como el AMPA son considerados carcinogénicos para los humanos (IARC, 2015). Algunos estudios sugieren que estos her-

bicidas pueden aumentar el riesgo de inflamación hepática o enfermedades cardio metabólicas en adultos. Además, se ha relacionado el GLY con problemas neurológicos y endocrinos tanto en humanos como en animales (Hu *et al.*, 2021; Ferrante *et al.*, 2023).

La agricultura tradicional en Yucatán ha vivido un cambio hacia el crecimiento del modelo agroindustrial, que se distingue por la utilización de cultivos genéticamente modificados, equipos mecanizados y productos químicos agrícolas para optimizar la producción de los sembradíos, además del uso extensivo de grandes volúmenes de glifosato. Debido a lo anterior es importante dar a conocer la presencia de glifosato y AMPA en los suelos de tres localidades del municipio de Tizimín, Yucatán.

Residuos de glifosato y AMPA en suelos de dos localidades de Tizimín

En el estado de Yucatán, los agricultores mantienen la existencia tradicional de la milpa para el cultivo de maíz como componente central, además de cultivos como calabaza, tomate y chile habanero (Polanco-Rodríguez y Araujo-León, 2018). Estudios recientes informan que el uso de glifosato por agricultores es del 55 % en el sur y 72 % al este de Yucatán (Tamayo-Manrique *et al.*, 2018).

En nuestro estudio se analizaron 11 muestras de suelo y 19 de agua de las localidades de Dzonot carretero y Kabichén del municipio de Tizimín, Yucatán. En las muestras de suelo solo la localidad Kabichén presentó concentraciones de GLY y AMPA (figura 1) con un promedio de 2.3 ± 2.6 y de 26.5 ± 68.1 $\mu\text{g}/\text{Kg}$, respectivamente. La variación en las concentraciones de GLY y AMPA podría deberse a las diferentes tipos de cultivo en cada sitio y principalmente a las cantidades aplicadas del herbicida en cada localidad en particular. En Kabichén se cultiva principalmente maíz y en Dzonot Carretero se produce maíz y calabaza Chihua.

Por otra parte, en las dos localidades se detectaron residuos de glifosato y AMPA en agua de los

pozos colectados. Las concentraciones promedio de GLY y AMPA en agua fueron de 3.5 ± 3.7 y 4.3 ± 3.0 $\mu\text{g}/\text{L}$ respectivamente en Dozonot Carretero y de 3.9 ± 3.8 y 4.8 ± 2.8 $\mu\text{g}/\text{L}$ en el mismo orden en Kabichén (figura 2).

Posteriormente, en octubre de 2023, se recolectaron y examinaron otras 19 muestras de agua subterránea procedentes de diversas comisarías en el municipio de Tizimín. Solo se encontró glifosato en cuatro muestras tomadas de las comisarías de San Luis Tzuk Tuk, con niveles de 0.3059, 0.2981, 0.1251 y 0.3845 $\mu\text{g}/\text{L}$. Siete meses más tarde, en mayo de 2024, se recogieron nuevas muestras en los mismos lugares, y todas dieron negativo para este herbicida, probablemente a causa de su descomposición y/o distribución a lo largo del tiempo. También se llevaron a cabo pruebas para detectar atrazina y 2,4-D, obteniendo resultados negativos en todos los casos.

El glifosato se utiliza frecuentemente en los cultivos transgénicos o nativos como el maíz (Cuhra *et al.*, 2016) y en la producción de calabaza sembrada directamente, donde es habitual el uso de herbici-

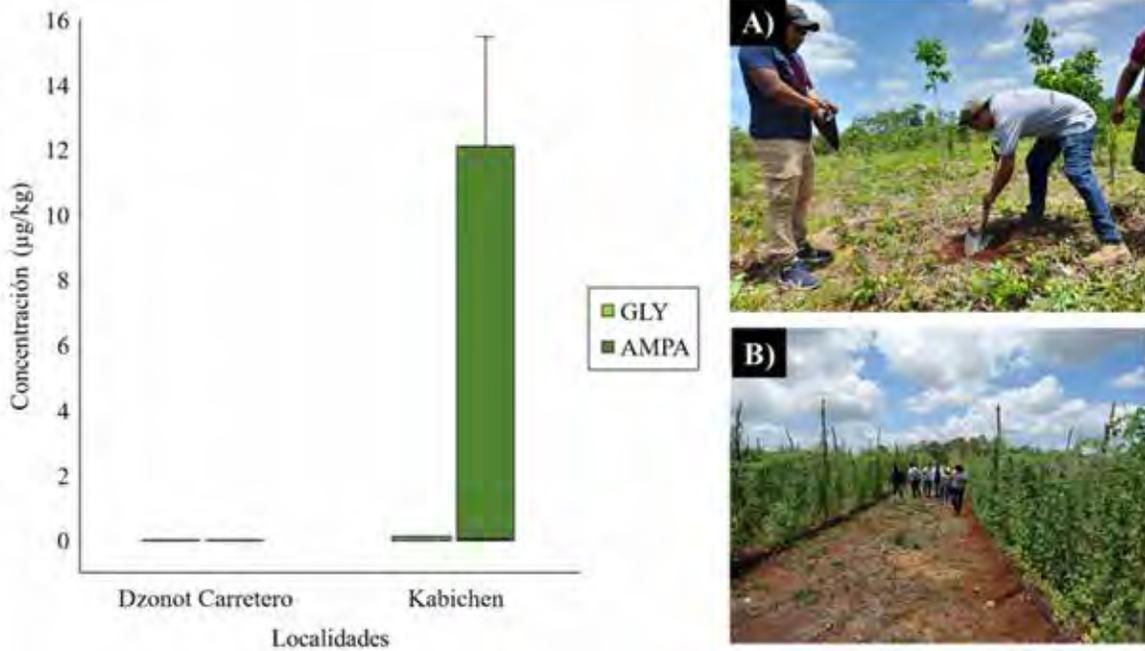


Figura 1. Concentraciones de glifosato y AMPA en suelos de dos localidades de Tizimín, Yucatán. A) cultivo de maíz de la localidad de Kabichén y B) cultivo de calabaza de la localidad de Dzonot Carretero.

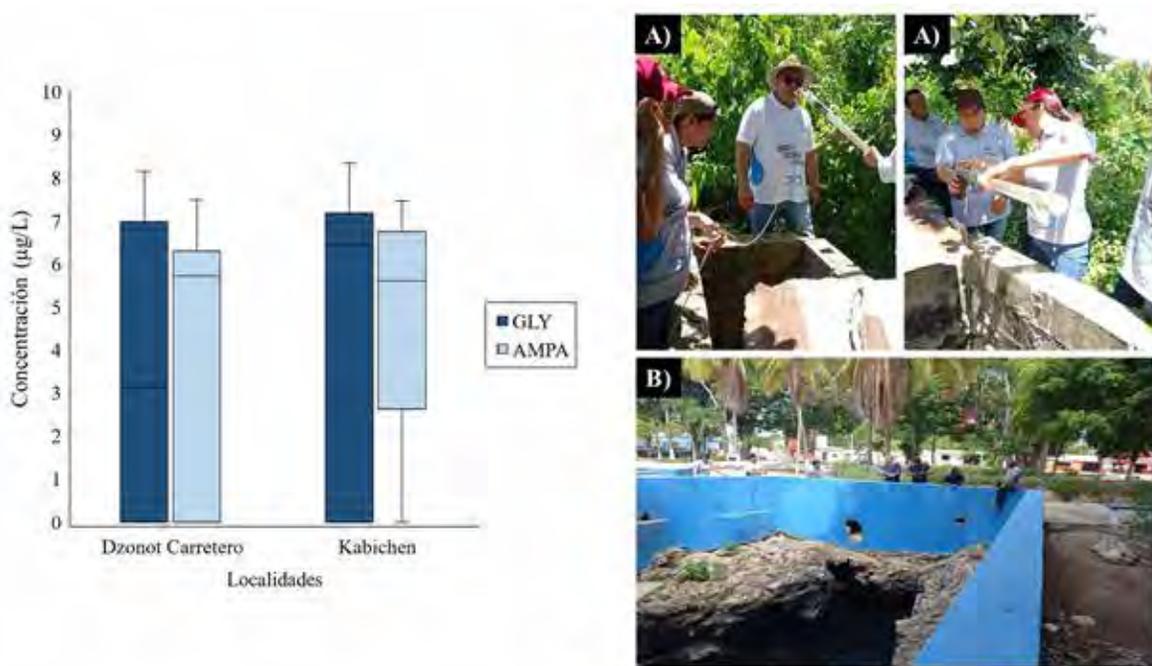


Figura 2. Concentraciones de glifosato y AMPA en muestras de agua subterránea de las localidades A) Dzonot Carretero y B) Kabichén, Yucatán.



das como el GLY para el control de malezas previo al cultivo (Walters y Young, 2012).

Se ha observado que las aplicaciones repetidas e intensas de GLY en cultivos de siembra directa generan un riesgo de contaminación en las aguas subterráneas, provocando la presencia de GLY y AMPA en el suelo (Carretta *et al.*, 2021). Debido a la gran cantidad aplicada de este herbicida en el suelo, no es fácil que se elimine por completo.

El maíz (*Zea mays L.*) constituye la base principal de la alimentación cotidiana en los hogares de México. Este cultivo se encuentra entre los más significativos del país y en el estado de Yucatán, donde se siembra de manera temporal en milpas utilizando terrenos que no se pueden mecanizar (Ku-Pech *et al.*, 2023). Sin embargo, en 2017 la empresa Enerrall ha incorporado nuevas superficies mecanizadas en Tizimín para el establecimiento de cultivos agrícolas como maíz, soya y sorgo, abarcando 4 489 hectáreas. Esto se incrementó con 7 000 hectáreas que fueron transformadas y un área sembrada de 6,000 hectáreas en el 2018 (FIRA, 2018). Sandoval-Gío *et al.* (2022) reportaron concentraciones de GLY en agua de estuarios cercanos a Tizimín. Debido a lo anterior es importante monitorear tanto el agua como el suelo de esta región oriental de Yucatán.

La presencia de GLY en el suelo se relaciona en gran medida con su lenta tasa de desorción, esto

es, hay un intercambio de moléculas, en el que el Gly se libera mientras que las moléculas de agua o los compuestos disueltos entran (Meftaul *et al.*, 2020). Una vez adsorbidos, los residuos de GLY podrían persistir durante casi un año en el suelo (Okada *et al.*, 2019). La dispersión de GLY en suelos de cultivo depende de diversos factores, como el clima, los parámetros fisicoquímicos y biológicos del suelo (pH, humedad, materia orgánica, biomasa y actividad microbiana, etc.) y las características del propio contaminante (estructura molecular, adsorción, solubilidad y persistencia en el medio donde se encuentra) (Meftaul *et al.*, 2020). La contaminación del suelo por glifosato y AMPA produce efectos adversos en los organismos (Sihtmäe *et al.*, 2013). Existen estudios ecotoxicológicos del glifosato en organismos del suelo; por ejemplo, el GLY en anélidos (*Eisenia fetida*, *Aporrectodea caliginosa*) causa una menor fertilidad, presenta una tasa de crecimiento negativa en su dinámica poblacional y una menor supervivencia de los anélidos juveniles (Santadino *et al.*, 2014). En cuanto al producto de degradación AMPA, se ha encontrado que en la lombriz *E. fetida* produce efectos nocivos como pérdida de peso corporal y alteración en la reproducción al dar origen al aumento del número de capullos y juveniles con peso reducido (Niemyer *et al.*, 2018).

Agricultura vs Apicultura

La agricultura en Tizimín, Yucatán, es una actividad que provee muchos beneficios a la localidad en temas económicos, sociales y culturales. Este municipio es un importante productor de maíz y soya. En 2017 aportó el 56 % de la producción estatal del grano, lo que lo ubicó como el principal municipio productor de Yucatán (Huacuja, 2018). En los años 60, el cultivo de maíz era el más importante en el municipio de Tizimín, abarcando cerca de 49 mil hectáreas. Para el año 2013, se comenzaron a cultivar 510 hectáreas de soya transgénica, que

aumentaron a 5 798 hectáreas en 2017 (PHINA, 2013).

En lo que respecta a la apicultura, esta se considera la otra actividad fundamental de subsistencia para muchos productores en Yucatán y constituye una fuente económica significativa, dado que el 95 % de su miel producida se envía a centros de acopio, los cuales están destinados a la exportación en varios países de la Unión Europea como Alemania y en Países del Oriente Medio como Arabia Saudita (Güemes-Ricalde *et al.*, 2003, Wallace, 2020).



La apicultura como actividad económica juega un papel crucial en la preservación de la diversidad biológica y en el impulso de prácticas agrícolas sostenibles. En Yucatán, esta práctica tiene una larga historia, sostenida durante siglos por el cuidado de abejas nativas sin aguijón. Desde que en 1911 se introdujo la abeja *Apis mellifera*, el saber sobre apicultura ha sido transmitido a través de las generaciones (Gupta *et al.*, 2014). La región de Yucatán se destaca por ser una de las zonas líderes en la producción de miel en México, aportando el 40 % del total de miel que se genera en el país (Batllori-Sampedro, 2024). En el municipio de Tizimín, un gran número de apicultores se dedica a la apicultura como un oficio secundario, con un promedio de 37 colmenas para cada apicultor (Morille, 2020).

En la región de la península de Yucatán se ha observado un aumento en la mortalidad masiva de abejas, lo cual está vinculado al uso de agrotóxicos

principalmente como el fipronil y los insecticidas neonicotinoides. Estos productos químicos se aplican en cultivos como el sorgo y el chile de la península de Yucatán, especialmente en los municipios de Bacalar y José María Morelos en Quintana Roo, así como en Hopelchén en Campeche y Tizimín en Yucatán (Vandame *et al.*, 2021). Por otra parte, los productores de miel de Tizimín reconocen que el cultivo de pastos para el ganado es un factor que contribuye a la disminución de las especies de abejas. Además, la explotación de árboles para leña y ganadería, junto con quemas irresponsables, provoca una mayor pérdida de estas especies melíferas (Morille, 2020). Debido a lo anterior, la producción de miel está experimentando una baja, y los apicultores también enfrentan las consecuencias de la deforestación, así como de la contaminación en suelos y aguas subterráneas (Anderson, 2005).

Efectos del glifosato en la salud de las abejas

Aunque la dosis letal media (DL_{50}) oral y de contacto del glifosato se determinó en 100 y >100 $\mu\text{g}/$ abeja, lo que sugiere una baja toxicidad aguda, sin embargo, estudios recientes han demostrado que todas las formulaciones de glifosato causan efectos subletales en las abejas, o sea, la abeja no muere pero se enferma y no es productiva, lo que genera una gran preocupación. Por ejemplo, el GLY y sus diversas presentaciones han demostrado tener un impacto perjudicial en la supervivencia, el crecimiento y el comportamiento de las abejas (figura 3), incluso al aplicarse en las dosis y concentraciones sugeridas por el productor.

El GLY afecta a las bacterias que viven en simbiosis con los animales que residen cerca de las áreas agrícolas, incluyendo a los polinizadores como las abejas. En las abejas melíferas, la microbiota intestinal está compuesta principalmente por ocho especies bacterianas que favorecen el aumento de peso y disminuyen la vulnerabilidad a patógenos. La presencia del gen que codifica la EPSPS se en-

cuentra en casi todos los genomas estudiados de las bacterias intestinales de las abejas, lo que sugiere su posible susceptibilidad al glifosato. Además, la disminución de la cantidad de bacterias intestinales útiles en las abejas causa un desequilibrio en sus sistemas inmunológicos (Motta *et al.*, 2022).

Una investigación llevada a cabo por Herbert *et al.* (2014) reveló alteraciones en las habilidades cognitivas relacionadas con el aprendizaje olfativo de las abejas melíferas luego de estar expuestas a 2.5 mg/L de GLY. De igual manera, un estudio de Balbuena y colaboradores (2015) indicó que las abejas que consumieron una mezcla de sacarosa con 10 mg/L de GLY se tomaron más tiempo para realizar vuelos directos entre el punto de liberación y la colmena en comparación con las abejas control. Estos hallazgos sugieren que la exposición a GLY influye en el retorno de las abejas recolectoras.

Vázquez *et al.* (2018) encontraron que abejas alimentadas con pequeñas cantidades de GLY mostraron una mayor tendencia a experimentar



Figura 3. Afectación de las abejas por el glifosato.

una muda tardía y tenían un peso menor en comparación con el grupo de control. También se ha demostrado que este herbicida funciona como un agente estresante que impacta el crecimiento de las larvas, lo que podría influir en la viabilidad general de la colonia a largo plazo.

Hay evidencia científica que conduce a que el glifosato tiene efectos a largo plazo en la salud humana y sobre las abejas (<https://www.pan-europe.info/blog/yes-glyphosate-harmful-bees>) entre otros organismos, pero los intereses económicos de las transnacionales son muy fuertes y hacen que muchas decisiones políticas se sesguen y permitan su uso, como lo que sucedió en Europa en 2023 (<https://es.euronews.com/my-europe/2023/11/16/bruselas-permite-el-uso-de-glifosato-en-la-ue-durante-10-anos-mas-despues-de-que-los-estad>).

En 2024 la Unión Europea renovó por 10 años más la licencia para usar glifosato en ese continente. Países como Alemania, Francia e Italia se abstuvieron para otorgar la renovación, pero muchos países como España votaron a favor. La "HEAL Alianza para la Salud y el Medio Ambiente" (Health and Environment Alliance) expresaron que "este nuevo fracaso para reunir una mayoría de los Estados miembros a favor de una renovación de 10 años del glifosato muestra que se ha vuelto políticamente imposible ignorar el estado de la ciencia".

Conclusiones

En la región de Tizimín, Yucatán, se cultiva maíz y soya transgénica, variedad que requiere el uso de glifosato como sistema de control de malezas. Esto es de suma importancia en Tizimín, ya que su economía se basa en la producción de maíz y soya y como actividad secundaria la apicultura.

De acuerdo con nuestros resultados se demuestra la presencia de GLY y AMPA, con cultivos de maíz transgénico. Los resultados indican que la distribución del glifosato y AMPA son muy similares en el manto acuífero, pero en suelo se presentó una variación probablemente debido a la temporada de



aplicación de GLY en los cultivos, así como a las características del suelo.

Es sumamente importante evaluar la salud de las abejas de la región de Tizimín debido a la posible exposición que tienen al glifosato y otros agrotóxicos como el fipronil y neonicotinoides. Un ejemplo claro de lo antes mencionado es que en mayo de este año, el uso de plaguicidas causó la muerte de miles de abejas en la localidad de Nohalal, Tekax, Yucatán. Los apicultores mencionaron que perdieron 300 colmenas por la aplicación de plaguicidas

a través de drones pertenecientes a la empresa Granos y Vegetales de Yucatán.

Es importante enfatizar que tanto el GLY como el AMPA son sustancias clasificadas como cancerígenas por la OMS, lo cual puede generar un riesgo para la salud pública donde se usa. No obstante, se requieren investigaciones adicionales para entender mejor la contaminación, sus posibles efectos y la variación en las concentraciones de GLY y AMPA en distintas matrices ambientales del municipio de Tizimín.

Agradecimientos

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) Por el financiamiento del proyecto 17862.23-P.

Se agradece al Mtro Gamaliel Canto Dzul, de Agua y Conciencia A.C. por todo su apoyo para la toma de muestras de agua y suelo de las localidades de Dzonot Carretero y Kabichen, Tizimin, Yucatán.

Los resultados presentados son parte del proyecto SECITHI “Presencia de glifosato y AMPA en suelo, agua y orina humana en distintas regiones de México (0322599)”

Referencias

- Anderson, E.N. (2005). Political ecology in a Yucatec Maya community. University of Arizona Press. 2-199.
- Balbuena, M.S., Tison, L., Hahn, M.-L., Greggers, U., Menzel, R., Farina, W.M. (2015). Effects of sublethal doses of glyphosate on honeybee navigation. *J. Exp. Biol.*, 218: 2799–2805. <https://doi.org/10.1242/jeb.117291>.
- Batllori Sampedro, E. A. (2024). The Beekeeping Areas of the State of Yucatán, for the Promotion of their Rational Use and the Transition Towards Organic Honey Production and Botanical Certification. *Int J Agriculture Technology*, 4(4): 1-12.
- Carretta, L., Cardinali, A., Onofri, A., Masin, R., Zanin, G. (2021). Dynamics of glyphosate and aminomethylphosphonic acid in soil under conventional and conservation tillage. *International Journal of Environmental Research*, 15: 1037-1055. <https://doi.org/10.1007/s41742-021-00369-3>.
- Cuhra, T. Bøhn, Cuhra, P. (2016). Glyphosate: too much of a good thing?. *Frontiers in Environmental Science*, 4, 28. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2016.00028>.
- Duke, S.O., Powles, S. B., Sammons, R. D. (2018). Glyphosate—How it became a once in a hundred-year herbicide and its future. *Outlooks on Pest Management*, 29(6), 247-251.
- Ferrante, P., Rapisarda, A., Grasso, C., Favara, Conti, G.O. (2023). Glyphosate and environmental toxicity with “One Health” approach, a review. *Environmental Research*, 116678. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.116678>.
- Gupta, R. K., Khan, M. S., Srivastava, R. M., Goswami, V. (2014). History of beekeeping in developing world. In *Beekeeping for poverty alleviation and livelihood security* (pp. 3-62). Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-9199-1_1.
- FIRA. (2018). Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura, FIRA Impulsa el crecimiento de la superficie agrícola en el Oriente de Yucatán. <https://www.gob.mx/fira/articulos/fira-impulsa-el-crecimiento-de-la-superficie-agricola-en-el-orient-de-yucatan?idiom=es>.
- Huacuja, F. E. (2018). Reconversión productiva en Yucatán, México: de maíz y pastizales a soja. *Papeles de Geografía*, (64): 181-197. <https://doi.org/10.6018/geografia/2018/340111>.



- Herbert, L.T., Vazquez, D.E., Arenas, A., Farina, W.M. (2014). Effects of field-realistic doses of glyphosate on honeybee appetitive behaviour. *J. Exp. Boil.*, 217, 3457–3464. <https://doi.org/10.1242/jeb.109520>.
- Hu, C., Lesseur, Y., Miao, F., Manservigi, S., Panzacchi, D., Mandrioli, F., Belpoggi, J., Chen, L., Petrick, 2021. Low-dose exposure of glyphosate-based herbicides disrupt the urine metabolome and its interaction with gut microbiota. *Sci. Rep.*, 11, 3265. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-82552-2>.
- International Agency for Research on Cancer(2024) Some Organophosphate Insecticides and Herbicides: Diazinon, Glyphosate, Malathion, Parathion, and Tetrachlorvinphos. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/?term=IARC+Working+Group+on+the+Evaluation+of+Carcinogenic+Risks+to+Humans%5BCorporate+Author%5D,2017> (accessed 13 March 2024).
- Ku-Pech, E. M., Mijangos-Cortés, J. O., Islas-Flores, I., Sauri-Duch, E., Latournerie-Moreno, L., Rodríguez-Llanes, Y., Simá-Gómez, J. L. (2023). Maize diversity in three geomorphological regions of Yucatan, Mexico. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 26(3). <http://dx.doi.org/10.56369/tsaes.4853>.
- Mardero, S., Schmook, B., López-Martínez, J.O., Cicero, L., Radel, C., & Christman, Z. (2018). The uneven influence of climate trends and agricultural policies on maize production in the Yucatan Peninsula, Mexico. *Land*, 7(3), 80. <https://doi.org/10.3390/land7030080>.
- Meftaul, I.M., Venkateswarlu, K., Dharmarajan, R., Annamalai, P., Asaduzzaman, M., Parven, A., Megharaj, M. (2020). Controversies over human health and ecological impacts of glyphosate: Is it to be banned in modern agriculture?. *Environmental Pollution*, 263, 114372. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114372>.
- Morille, C. (2020). Cambios socioambientales que han impactado en la apicultura en Yucatán. Universidad Miguel Hernández de elche.
- Motta, E. V. S., Raymann, K. y Moran, N. A. (2018). Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* 115: 10305–10310. <https://doi.org/10.1073/pnas.1803880115>.
- Motta, E. V., Powell, J. E., Moran, N. A. (2022). Glyphosate induces immune dysregulation in honey bees. *Animal Microbiome*, 4(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s42523-022-00165-0>.
- Niemeyer, F.B. de Santo, N., Guerra, A.M., Filho, R., Pech, T.M. (2018). Do recommended doses of glyphosate-based herbicides affect soil invertebrates? Field and laboratory screening tests to risk assessment. *Chemosphere*, 198: 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.01.127>.
- Okada, E., Costa, J.L., Bedmar, F. (2019). Glyphosate dissipation in different soils under no-till and conventional tillage. *Pedosphere*, 29(6): 773-783. [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(17\)60430-2](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(17)60430-2).
- Padrón e Historial de Núcleos Agrarios (PHINA) del Registro Agrario Nacional (RAN)(2025) en línea [<http://phina.ran.gob.mx/phina2>], consultada en mayo de 2025.
- Polanco-Rodríguez A.G., Araujo-León, J.A. (2018). The glyphosate herbicide in Yucatan, Mexico. *MOJ Bioequivalence Bioavailability*, 5(6): 284–286. <https://doi.org/10.15406/mojbb.2018.05.00115>.
- Ramírez, L. P., Schmook, B., Mier y Terán Giménez Cacho, M., Calmé, S., Mendez-Medina, C. (2023). Public Policies Shaping Mexican Small Farmer Practices and Environmental Conservation: The Impacts of 28 Years of PROCAMPO (1994–2022) in the Yucatan Peninsula. *Land*, 12(12), 2124. <https://doi.org/10.3390/land12122124>.
- Ramírez-Jaramillo, G., Lozano-Contreras, M.G. Ramírez Silva, J.H. (2018). Zonificación productiva para maíz de temporal en la península de Yucatán. *Revista del Centro de Graduados e Investigación. Instituto Tecnológico de Mérida*, 33(75): 123-128.
- Ricroch, A., Akkoyunlu, S., Martin-Laffon, J., Kuntz. (2018). Assessing the environmental safety of transgenic plants: honey bees as a case study. In *Advances in botanical research* (Vol. 86, pp. 111-167). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.abr.2017.11.004>.
- Sandoval-Gío J.J., Polanco-Rodríguez Á.G., Araujo-León J.A., Burgos-Díaz M.I., Yáñez-Rivera B., la Cruz J.C. (2022). First Evidence of Glyphosate in American Horseshoe Crab from the Yucatan Peninsula in Mexico. *Bull Environ Contam Toxicol*. 108(4): 646-651. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03412-3>.
- Sandford, M.T. (2003). The World of GMOs. How it Relates to Beekeeping. *American Bee Journal*. Vol, 134.
- Santadino, C. Coviella, F., Momo, F. 2014. Glyphosate sublethal effects on the population dynamics of the earthworm *Eisenia fetida* (Savigny, 1826). *Water, Air, & Soil Pollution*, 225: 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2207-3>.
- Sihtmäe, M., Blinova, I., Künnis-Beres, K., Kanarbik, L., Heinlaan, M., & Kahru, A. (2013). Ecotoxicological effects of different glyphosate formulations. *Applied Soil Ecology*, 72: 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2013.07.005>.
- Soto-Muciño, L. E., Chiatchoua, C., Castañeda-González, Y. (2015). National and international panorama of honey production in Mexico. *ECORFAN Journal-Republic of Cameroon*, 1(1), 15-33.
- SEDUMA. (2012). Secretary of Urban Development and Environment. Scientific technical justification for issuing favorable opinion to requests for free zones of crops of genetically modified organisms in the state of Yucatan.
- Székács, A., Darvas, B. (2012). Forty years with glyphosate. Herbicides-properties, synthesis and control of weeds, 14: 247-284.



- Tamariz, G. (2013). GM crops vs. Apiculture. An ecological distribution conflict in the Mayan region of Mexico (Doctoral dissertation, Institute of Environmental Science and Technology, ICTA, Autonomous University of Barcelona).
- Tamayo-Manrique J.M., Polanco-Rodríguez A.G., Munguía-Gill A. (2018). The management of agrochemicals in agriculture in the municipality of Dzidzantun, Yucatan, Mexico. Under Revision.
- Vandame, R., Gómez, I., Gracia, A., Acosta, S. (2021). Ser apicultor, ser político. *Ecofronteras*, 18-20.
- Vázquez, D.E., Ilina, N., Pagano, E.A., Zavala, J.A., Farina, W.M. (2018). Glyphosate affects the larval development of honey bees depending on the susceptibility of colonies. *PLoS ONE* 13: e0205074. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0205074>.
- Wallace, G.H. (2020). The History and Geography of Beeswax Extraction in the Northern Maya Lowlands, 1540–1700. McGill University (Canada).
- Walters, & Young, B.G. (2012). Herbicide application timings on weed control and jack-o-lantern pumpkin yield. *HortTechnology*, 22(2): 201-206. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.22.2.201>.



Aké Turriza, K.A., y Rivera-Arriaga, E. 2025. Islas de calor urbanas bajo escenarios de cambio climático. JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático 7(1): 67-94. doi 10.26359/52462.0705.



Artículo de revisión: Islas de calor urbanas bajo escenarios de cambio climático

Review article: Urban heat islands under climate change scenarios

Karianna A. Aké Turriza^{1,} y Evelia Rivera-Arriaga²*

¹Posgrado Multidisciplinario para el Manejo de la Zona Costero-Marina, Instituto EPOMEX
Universidad Autónoma de Campeche

²Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX),
Universidad Autónoma de Campeche

* autor de correspondencia: al041220@uacam.mx

doi 10.26359/52462.0705

Recibido 15/enero/2025. Aceptado 20/abril/2025

JAINA Costas y Mares ante el Cambio Climático

Coordinación editorial de este número: Yassir E. Torres Rojas

Este es un artículo bajo licencia Creative Commons CC BY-NC-ND.



Resumen

Las Islas de Calor Urbanas (ICU) representan un fenómeno estudiado y documentado en el contexto del cambio climático y la urbanización. Este artículo de revisión ofrece una visión de la caracterización de las ICU en el contexto de los escenarios de cambio climático, destacando elementos como la variabilidad climática, la vulnerabilidad urbana y las estrategias de mitigación. Se analizan los progresos en la comprensión de las ICU, incluyendo investigaciones recientes sobre su dinámica y efectos a largo plazo. Se exploran medidas para abordar esta problemática en entornos urbanos, como el diseño urbano sostenible, el aumento de áreas verdes y la promoción de tecnologías de enfriamiento urbano. En esta revisión se abordan los estudios realizados sobre las Islas de Calor Urbanas, de los últimos 14 años; dando un total de 119 publicaciones relacionadas sobre la temática que han contribuido significativamente a la comprensión de las ICU, proporcionando nuevas perspectivas sobre su dinámica, impactos y posibles soluciones.

Palabras claves: Islas de Calor Urbanas (ICU), cambio climático, urbanización, ciudades sostenibles, riesgos.

Abstract

Urban Heat Island (UHI) represents a phenomenon studied and documented in the context of climate change and urbanization. This review article offers a view of the characterization of ICUs in the context of climate change scenarios, highlighting elements such as climate variability, urban vulnerability and mitigation strategies. Progress in understanding ICUs is discussed, including recent research on its dynamics and long-term effects. Measures are explored to address this problem in urban environments, such as sustainable urban design, increasing green areas and promoting urban cooling technologies. This review addresses the studies carried out on Urban Heat Islands over the last 14 years; giving a total of 119 related publications on the subject that have contributed significantly to the understanding of ICUs, providing new perspectives on their dynamics, impacts and possible solutions.

Keywords: Urban Heat Islands (UHI), climate change, urbanization, sustainable cities, risks.



Introducción

La creciente urbanización y el cambio climático son temas interrelacionados que moldean el paisaje de nuestras ciudades modernas, planteando problemáticas para la sostenibilidad ambiental y la calidad de vida urbana. En este contexto, según Soltani, y Sharifi (2017) las Islas de Calor Urbano (ICU) emergen como un fenómeno de importancia, caracterizado por áreas dentro de los entornos urbanos que experimentan temperaturas notablemente más altas que sus alrededores. Estas ICU no sólo afectan el confort térmico de los residentes urbanos, sino que también conllevan implicaciones significativas para la salud pública, el consumo de energía y la calidad del aire.

Varios investigadores han destacado los efectos de la (ICU) y su impacto en las áreas urbanas. Estudios realizados por Oke *et al.* (2017), Buyadi *et al.* (2013) y Kabisch *et al.* (2023) destacan cómo la configuración urbana y la densidad de construcción contribuyen al aumento de la temperatura en el centro de las ciudades en comparación con las zonas rurales circundantes. La falta de áreas verdes y la canalización de cursos de agua en entornos urbanos exacerbando aún más este fenómeno.

La geometría urbana, la actividad humana y los factores meteorológicos son determinantes en la formación de la ICU, como lo señalan Erell *et al.* (2011), García (1990) y Taleb y Abu-Hijleh (2013). La absorción de radiación, la reflexión de la radiación por edificios altos y las emisiones contaminantes derivadas de la urbanización son factores clave.

Las Islas de Calor Urbanas no solo tienen implicaciones en el clima local, sino que también afectan la salud y el bienestar de la población urbana. Según Villanueva *et al.* (2013), el aumento en el consumo de energía eléctrica para combatir el calor contribuye a la emisión de gases contaminantes, exacerbando así los efectos nocivos de la ICU.

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, 2021) señala que la ICU intensa durante olas de calor representa un riesgo adicio-

nal para la salud pública, especialmente para las personas mayores o enfermas (Martín-Vide *et al.*, 2016). En un contexto de cambio climático, donde las temperaturas extremas son más frecuentes, es importante abordar estos riesgos para mitigar sus impactos adversos en los sistemas humanos y naturales.

Para abordar estas problemáticas, se han propuesto diversas estrategias de mitigación de la Isla de Calor Urbano. Aliviar el efecto isla de calor urbano es de gran importancia para mejorar el confort térmico, el ahorro de energía y la reducción de carbono, y lograr un desarrollo urbano sostenible (Hong *et al.*, 2023). Métodos como la ecologización de tejados y la pavimentación reflectante se han destacado como eficaces para reducir la temperatura y mitigar los impactos de la ICU (Schneider *et al.*, 2023).

En resumen, la comprensión de los factores que contribuyen a la formación de la Isla de Calor Urbano y su relación con el cambio climático es fundamental para desarrollar estrategias efectivas de adaptación y mitigación que protejan la salud y el bienestar de las comunidades urbanas. Este artículo busca explorar exhaustivamente la caracterización de las ICU en el contexto del cambio climático y la urbanización, así como abordar estrategias de adaptación y mitigación basadas en evidencia científica (Brenner *et al.*, 2023).

El propósito fundamental de esta de revisión es explorar de manera exhaustiva la caracterización de las ICU en el contexto del cambio climático y la urbanización, así como abordar estrategias de adaptación y mitigación, resumir los resultados de investigaciones previas sobre las ICU, destacando las tendencias observadas, los factores de influencia y las estrategias de mitigación y adaptación propuestas.

Este artículo cuenta con un claro objetivo de carácter descriptivo-exploratorio, que consiste en sintetizar y comparar los resultados de investigaciones previas sobre las ICU. El propósito es proporcionar



una visión amplia y actualizada de las ICU, con el fin de informar y orientar futuras investigaciones y

acciones en el ámbito de la planificación urbana y la gestión ambiental.

Metodología

Método

Con el fin de alcanzar el objetivo mencionado, se han aplicado ciertos criterios de búsqueda y de inclusión para elegir los estudios que han sido incorporados en esta revisión. A continuación, se detallan ambos criterios.

Estrategia de búsqueda

En esta sección se examinan los métodos utilizados para buscar la literatura relevante, reconociendo que ningún método de búsqueda puede ser completamente exhaustivo debido a las numerosas variables que restringen la capacidad para acceder a toda la información publicada.

Se usaron tres técnicas de búsqueda para la obtención de los artículos científicos originales (fuentes primarias de datos), los cuales posteriormente se pasaron por el filtro de los criterios de inclusión (figura 1).

- Búsquedas en bases de datos bibliográficas. Se realizó una búsqueda exhaustiva en diversas bases de datos nacionales e internacionales, específicamente en Springer, DOAJ y World Wide Science, con el objetivo de rastrear bibliografía y acceder a las fuentes primarias de información.
- Las palabras clave utilizadas fueron: Islas de Calor Urbanas (ICU), cambio climático, urbanización, ciudades sostenibles, riesgos.
- Búsquedas en motores de búsqueda. Se llevaron a cabo exploraciones en motores de búsqueda, incluyendo Google Académico, empleando las mismas palabras clave. También se realizó una búsqueda por autor y título de aquellos artículos que no estaban disponibles en su totalidad en las bases de datos.

Criterios de inclusión

Una vez que se obtuvieron los resultados de las búsquedas utilizando las tres técnicas mencionadas anteriormente, todos los artículos fueron sometidos a un proceso de filtrado. Sólo se incluyeron en la revisión aquellos estudios que cumplían con los criterios siguientes:

- Acceso completo al artículo científico: Se priorizó el acceso completo al artículo para garantizar la disponibilidad de toda la información relevante, como el número y características de los participantes, el diseño del estudio, el país de realización y los resultados obtenidos.
- Focalización en el fenómeno de las islas de calor urbano: Se incluyeron investigaciones que se centren en la caracterización de las islas de calor urbano, así como en el desarrollo y evaluación de estrategias para mitigar sus efectos en el entorno urbano. Se excluyeron investigaciones que no estuvieran directamente relacionadas con este tema.
- Relevancia de los datos proporcionados: Se priorizaron los estudios que ofrecieran datos relevantes sobre la formación, distribución y efectos de las islas de calor urbano, así como medidas de adaptación y mitigación. Se excluyeron investigaciones basadas únicamente en modelos teóricos sin datos empíricos.
- Practicidad de las recomendaciones: Se incluyeron investigaciones que ofrecieran recomendaciones prácticas para mitigar los efectos de las islas de calor urbano a nivel local y global. Se excluyeron investigaciones que no proporcionaran orientación basada en evidencia sobre métodos específicos para mitigar este fenómeno.

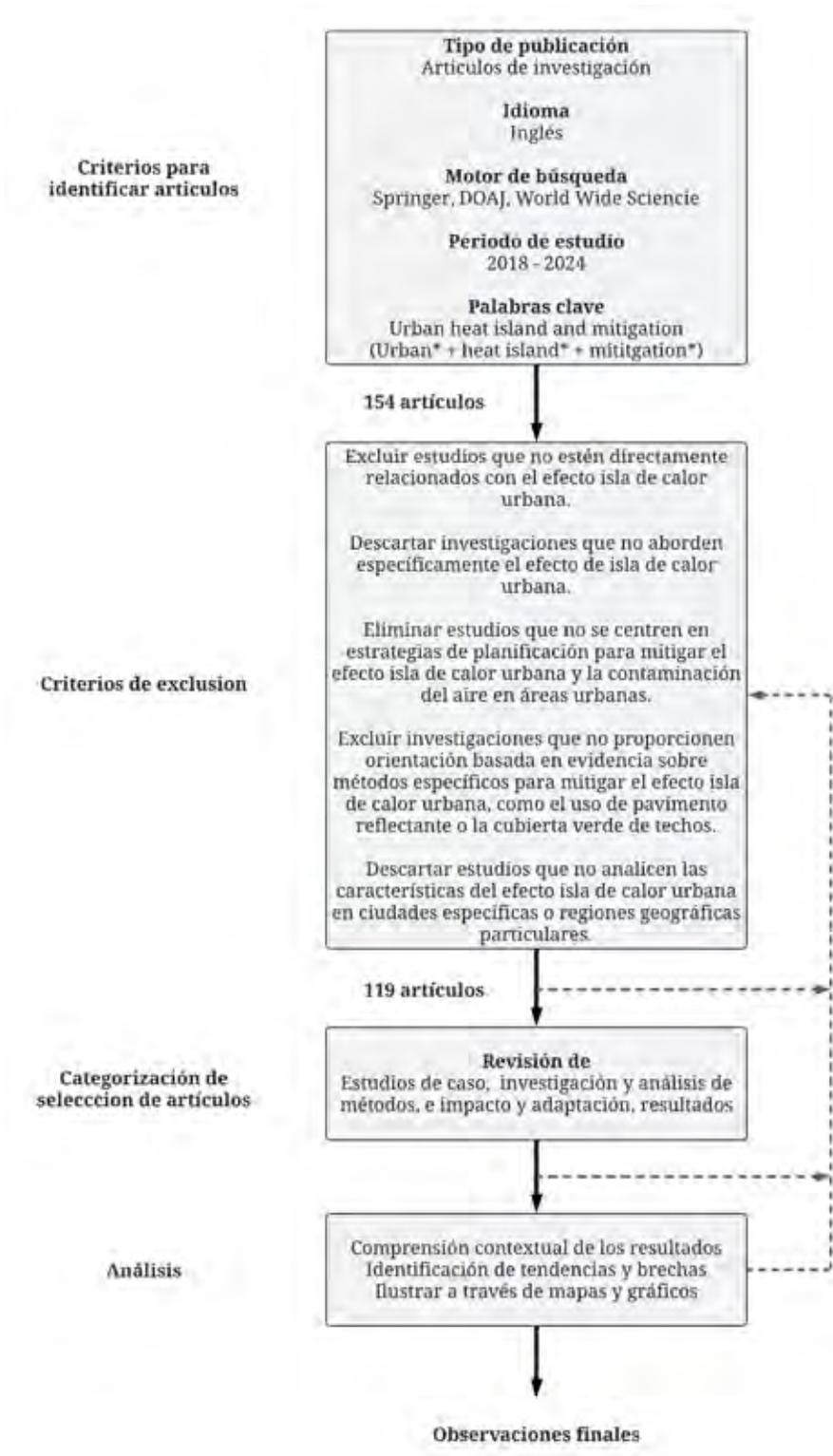


Figura 1. Análisis para la revisión de estudios de islas de calor. Fuente: Elaboración propia.



Se generó un mapa que muestra las ubicaciones de los estudios y la frecuencia de los estudios por país, utilizando la base de datos en Excel. (figura 2).

Además, se registró las causas y efectos de las islas de calor en zonas urbanas, así como estrategias de mitigación (e.g. techos verdes, aumento de la vegetación urbana), factores de riesgo (e.g., densidad de construcción, uso del suelo), con el fin de profundizar la comprensión de lo que aporta cada estudio al conocimiento sobre las islas de calor urbanas.

Descripción general de las investigaciones de las islas de calor

Se identificaron 119 artículos publicados entre 2010 y 2024, provenientes de 47 países alrededor del mundo. La mayoría de los estudios se originaron en los siguientes países: Estados Unidos con 20 estudios, China con 19 estudios, Alemania con 7 estudios, Australia con 7 estudios e Italia con 6 estudios.

El primer estudio sobre islas de calor que identificamos en nuestra investigación es la publicación

de Silva (2010), que aborda la modelización de los efectos de las estrategias de mitigación de las islas de calor urbanas sobre la morbilidad relacionada con el calor. A partir de 2013, comenzaron a proliferar los estudios sobre estrategias de mitigación para combatir las islas de calor urbanas. Estos estudios han sido fundamentales para comprender los impactos negativos de las islas de calor y desarrollar soluciones efectivas.

La mayor parte de la investigación en los países mencionados anteriormente se concentra en las siguientes áreas (figura 3):

- **Métodos de investigación.** 35 artículos. Estos estudios se enfocan en desarrollar y mejorar metodologías para medir y analizar el fenómeno de las islas de calor. Incluyen técnicas de teledetección, modelado climático y análisis estadístico de datos meteorológicos.
- **Adaptación: 12 artículos.** Los estudios de adaptación exploran cómo las comunidades y las infraestructuras pueden ajustarse para enfrentar los efectos de las islas de calor. Esto incluye el diseño urbano resiliente, la planifi-



Figura 2. Distribución de estudios por país. Fuente: Elaboración propia.



Distribución de artículos por tema en el estudio de Islas de Calor

Cantidad de artículos científicos por tema

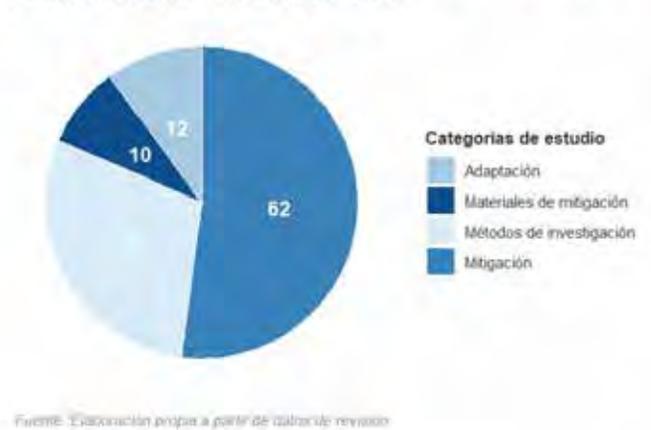


Figura 3. Distribución de artículos por tema en el estudio de Islas de Calor. Fuente: Elaboración propia.

cación de emergencia y las políticas públicas orientadas a reducir la vulnerabilidad al calor extremo.

- **Mitigación: 62 artículos.** La mayor parte de la investigación se dedica a estrategias de mitigación, que buscan reducir la intensidad y la extensión de las islas de calor. Entre las estrategias más comunes se encuentran la implementación de techos verdes, pavimentos fríos, aumento de la vegetación urbana y el uso de materiales reflectantes en las construcciones.
- **Materiales de mitigación: 10 artículos.** Estos estudios investigan materiales específicos que pueden ser utilizados para reducir las tempe-

raturas en áreas urbanas. Se analizan materiales innovadores para techos y pavimentos, así como pinturas y revestimientos con alta reflectancia solar.

Además, se han identificado varios factores clave que influyen en la efectividad de las estrategias de mitigación, tales como el clima local, la densidad urbana y las características socioeconómicas de las áreas afectadas. La colaboración internacional ha sido esencial para avanzar en este campo, permitiendo el intercambio de conocimientos y experiencias entre diferentes regiones y contextos climáticos.

Resultados

Cambio climático

Definición de cambio climático

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), el cambio climático se refiere a una alteración en las condiciones del clima atribuida directa o indirectamente a la actividad humana, que modifica la composición de la atmósfera mundial y se suma a

la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables. Esta definición se complementa con la aportación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), que lo describe como una transformación discernible en las condiciones climáticas, originada por cambios en el valor promedio y la variabilidad de características climáticas, y que se



mantiene a lo largo de períodos extensos, normalmente medidos en décadas o incluso siglos.

Según Miller (2007), el cambio climático a nivel mundial abarca alteraciones en cualquier componente del clima terrestre, incluyendo elementos como la temperatura, los patrones de lluvia, la intensidad de las tormentas y sus trayectorias.

Impacto del Cambio Climático en los Sistemas Globales

El fenómeno del cambio climático, influenciado por la actividad humana, se manifiesta en sus impactos en los sistemas físicos y biológicos a nivel global. Principalmente, estos efectos se observan en cambios de temperatura, especialmente notables en las latitudes altas y medias del hemisferio norte. Sin embargo, evidencia creciente indica que también se producen efectos significativos en los patrones de precipitación y temperatura, sugiriendo que el cambio climático está teniendo repercusiones en una variedad de sistemas y sectores más allá de las regiones del hemisferio norte (Rosenzweig y Neofotis, 2013). Estos cambios remodelan los patrones espaciales y temporales de la energía y la humedad globales (Chi *et al.*, 2023).

Evidencia científica y proyecciones futuras del Cambio Climático

Desde la década de 1950, se han observado cambios sin precedentes en los registros climáticos, incluyendo un calentamiento atmosférico, disminución de nieve y hielo, aumento del nivel del mar y concentraciones crecientes de gases de efecto invernadero (IPCC, 2013). Este período, conocido como el Calentamiento de principios del siglo XX (ETCW), destaca como uno de los episodios más significativos en el registro climático histórico anterior al calentamiento reciente, proporcionando una comprensión importante de la variabilidad climática y sus implicaciones futuras (Hegerl *et al.*, 2018).

Los estudios científicos indican un incremento en la frecuencia e intensidad de fenómenos meteorológicos extremos en las últimas cinco décadas, incluyendo altas temperaturas, olas de calor y pre-

cipitaciones intensas, con consecuencias potencialmente graves para la humanidad (IPCC, 2013). En los países en vías de desarrollo, los riesgos asociados al cambio climático están aumentando, representando un considerable porcentaje de su Producto Interno Bruto (PIB) (Buhr *et al.*, 2018).

El aumento en la concentración de gases de efecto invernadero ha aumentado la probabilidad de eventos extremos como olas de calor (Abatzoglou y Barbero, 2014). Informes como el del Banco Mundial en 2012 advierten sobre la posibilidad de un aumento de hasta 4°C en la temperatura promedio global para finales del siglo XXI, lo que podría resultar en eventos climáticos extremos como sequías severas e inundaciones significativas (Banco Mundial, 2012). Las publicaciones del IPCC también resaltan la urgencia de medidas adicionales de mitigación para frenar el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero y limitar el calentamiento global a menos de 3°C, o incluso 5°C para el año 2100 (IPCC, 2014).

Este análisis destaca que los ciclos del cambio climático, históricamente más lentos, se están acelerando, en gran parte debido a la actividad humana que aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero. Esta acumulación de gases en la atmósfera contribuye al calentamiento global, causando un aumento en la temperatura media del planeta y exacerbando los impactos del cambio climático (Oliver Yébenes, 2024).

Vulnerabilidad al cambio climático

El análisis de la vulnerabilidad es fundamental en el proceso de adaptación al cambio climático, ya que proporciona información importante para identificar las principales amenazas climáticas en un territorio específico y abordar las causas subyacentes que pueden aumentar los impactos en la sociedad. Los fenómenos extremos asociados al clima, como las olas de calor, sequías, inundaciones y ciclones tropicales revelan la vulnerabilidad tanto en los ecosistemas como en los sistemas humanos (CEPAL, 2014) (figura 4).

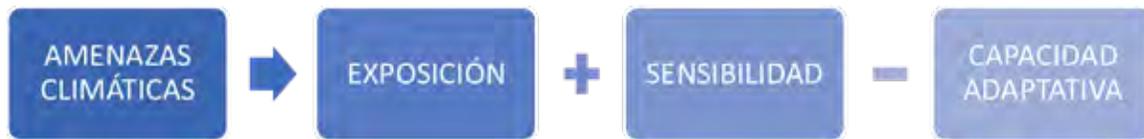


Figura 4. Factores que inciden en la vulnerabilidad de un sistema. (Fuente: Adaptado del IPCC, 2001).

La mayoría de los estudios sobre vulnerabilidad al cambio climático definen este concepto como una combinación de tres aspectos: la exposición de los sistemas a los fenómenos climáticos, la sensibilidad ante estas condiciones riesgosas y la capacidad de hacer frente a los impactos resultantes (CEPAL, 2014). Estas tres dimensiones permiten operativizar el concepto mediante indicadores tanto biofísicos como sociales, con el objetivo principal de cuantificar el fenómeno y establecer relaciones de causa y efecto entre eventos y recursos (Mussetta *et al.*, 2017). Por otro lado, los elementos que influyen en la vulnerabilidad frente al cambio climático están vinculados a la amenaza resultante de las modificaciones o fluctuaciones climáticas. Estos elementos incluyen el grado de exposición a una amenaza específica, la sensibilidad inherente de los sistemas naturales y humanos, y la capacidad de respuesta o adaptación de dichos sistemas. Esta capacidad de respuesta abarca recursos financieros, tecnológicos, así como habilidades organizativas y de planificación (Gutiérrez y Espinosa, 2010). En resumen, comprender la vulnerabilidad al cambio climático implica no solo reconocer los aspectos físicos y biológicos de los sistemas naturales, sino también considerar los factores socioeconómicos, políticos, culturales e institucionales que influyen en la capacidad de los sistemas humanos para enfrentar y adaptarse a los impactos climáticos adversos. Este enfoque integral es importante para desarrollar estrategias efectivas de mitigación y adaptación en el contexto del cambio climático global.

Caracterización del cambio climático

El cambio climático ha sido objeto de intensa investigación, especialmente en la descripción de sus

efectos a través de registros de observación. Abatzoglou y Barbero (2014) señalan que los análisis se centran en cambios en condiciones medias, como la temperatura anual, así como en medidas estadísticas que abarcan desde la frecuencia hasta la magnitud de las temperaturas extremas.

Los procedimientos de detección y atribución utilizados por Paeth *et al.*, (2017) buscan discernir si las anomalías y tendencias climáticas observadas están dentro del rango esperado de variabilidad natural o indican un cambio climático influenciado por la actividad humana.

Además de su relevancia estadística, los registros de temperatura desempeñan un papel importante en la definición del alcance geográfico de los ecosistemas y tienen importantes implicaciones sociales, como afectar al transporte, la demanda energética y la salud humana. La presencia o ausencia de registros de temperatura puede percibirse como un símbolo del cambio climático, independientemente de su respaldo científico.

Abatzoglou y Barbero (2014) anticipan que los registros de temperatura continuarán evolucionando en el siglo XXI, con un aumento en las lecturas más altas y una disminución en las más bajas, lo que tendrá consecuencias significativas para la demanda pico de energía y los efectos en la salud asociados con el calor, requiriendo medidas de adaptación.

Beever *et al.* (2010) señalan que los nuevos registros de temperatura podrían plantear riesgos considerables para los ecosistemas y la salud humana, mientras que Walther (2009) menciona que la disminución en la probabilidad de nuevos registros de frío puede tener beneficios y riesgos ecológicos.



Finalmente, Donat (2013) destaca que se espera que las temperaturas extremas sean más frecuentes, intensas y prolongadas debido al calentamiento global, enfatizando la importancia de documentar estas características y comprender los mecanismos físicos subyacentes para desarrollar estrategias efectivas de mitigación y adaptación.

Además de los aspectos mencionados anteriormente, es importante destacar que la comprensión y documentación del cambio climático no solo tienen implicaciones científicas y ambientales, sino también económicas y políticas. La necesidad de desarrollar estrategias de adaptación y mitigación efectivas se vuelve cada vez más urgente a medida que los efectos del cambio climático se hacen más evidentes en todo el mundo.

Las investigaciones revisadas señalan la importancia de considerar no solo las tendencias generales en los registros de temperatura, sino también la variabilidad regional y local, ya que los impactos del cambio climático pueden variar considerablemente según la ubicación geográfica (OECD, 2021).

Asimismo, se destaca la importancia de la colaboración internacional y la adopción de medidas coordinadas para abordar el cambio climático, ya que este es un problema global que requiere una respuesta global. La cooperación entre países, junto con políticas y acciones a nivel nacional, regional y local, es muy importante para enfrentar las problemáticas planteadas por el cambio climático y garantizar la sostenibilidad a largo plazo de nuestro planeta.

Los resultados de esta revisión destacan la necesidad de una acción urgente y coordinada para abordar el cambio climático y sus efectos. Esto incluye no solo la investigación continua para comprender mejor los mecanismos subyacentes y los impactos del cambio climático, sino también la implementación de políticas y medidas concretas para mitigar sus efectos y adaptarse a los cambios inevitables que ya están ocurriendo.

Modelos climáticos

Los modelos climáticos, como expresiones numéricas del sistema climático, han demostrado ser herramientas importantes para la investigación y comprensión del cambio climático. Estos modelos se basan en las características físicas, químicas y biológicas del sistema climático, así como en sus interacciones y procesos (IPCC, 2007). Además de su uso en la investigación, los modelos climáticos tienen aplicaciones operativas significativas, incluida la predicción climática en diversas escalas temporales (Argenal, 2010).

Los modelos climáticos actuales sugieren un aumento global de la temperatura que oscila entre 1.4 y 5.8 grados Celsius para el período comprendido entre 1990 y 2100. Estas proyecciones se derivan de suposiciones sobre diversas fuerzas impulsoras, como el crecimiento demográfico y el avance tecnológico. Sin embargo, es importante destacar que estas proyecciones no tienen en cuenta la implementación de políticas climáticas para reducir las emisiones (Díaz Cordero, 2012).

La revisión sistemática de los modelos climáticos y las proyecciones sobre el cambio climático revela la importancia de estos modelos como herramientas para comprender los patrones climáticos futuros. Sin embargo, es importante reconocer las limitaciones de estas proyecciones, especialmente en lo que respecta a la falta de consideración de políticas de mitigación de emisiones. Esto destaca la necesidad de acciones coordinadas a nivel global para abordar eficazmente el cambio climático y sus impactos potenciales.

Escenarios climáticos

Se revisa la importancia de los escenarios de cambio climático como herramientas fundamentales en la investigación de las posibles consecuencias del cambio climático causado por actividades humanas. Estos escenarios ofrecen una visión simplificada del clima futuro, basada en relaciones climáticas coherentes. Además, sirven como insumos clave en simulaciones de los impactos del cambio climático (CEPAL, 2019).



Para su creación, se considera un conjunto coherente de suposiciones sobre el futuro desarrollo de las emisiones de sustancias con potencial radiactivo, como los gases de efecto invernadero y los aerosoles. Estas suposiciones están influenciadas por factores como el crecimiento demográfico, el avance tecnológico y el desarrollo socioeconómico (CIIFEN, 2023).

La revisión efectuada destaca que la creación de estos escenarios es una fase importante en el desarrollo de estudios sobre la adaptación al cambio climático, ya que proporcionan una guía para la dirección a seguir en este proceso (Zermeño Díaz, 2008). En resumen, los escenarios de cambio climático son herramientas esenciales para comprender y abordar los desafíos que enfrenta el planeta debido al cambio climático inducido por el ser humano.

Clima

La importancia de la variabilidad climática en la sociedad humana

La variabilidad climática, entendida como los cambios en el estado medio y otras estadísticas del clima en diversas escalas temporales y espaciales, es un fenómeno de gran relevancia para la sociedad humana. Tanto los procesos naturales dentro del sistema climático (variabilidad interna) como las influencias externas naturales o antropogénicas (variabilidad externa) contribuyen a estos cambios (Argenal, 2010).

Esta variabilidad ejerce una influencia considerable en el bienestar de la sociedad humana, ya que está estrechamente vinculada con condiciones climáticas inusuales y eventos extremos. Por tanto, comprender a fondo esta variabilidad es esencial para formular acciones destinadas a mitigar y adaptarse, asegurando así la seguridad humana y la sostenibilidad (Behera, 2020).

La variabilidad climática abarca una amplia gama de escalas temporales, desde lo estacional hasta lo multidecenal, y presenta diversos patrones y atributos. Estas variaciones pueden influir en la eficacia de las estrategias de adaptación para mitigar

riesgos y en su aplicabilidad geográfica (Ember *et al.*, 2020).

Los factores que determinan la vulnerabilidad al cambio climático están relacionados con la amenaza resultante de las alteraciones o variaciones en el clima. Estos factores incluyen el nivel de exposición a una amenaza particular y la sensibilidad intrínseca de los sistemas naturales y humanos, así como su capacidad de respuesta o adaptación, que abarca recursos financieros, tecnológicos y habilidades organizativas y de planificación (Bernex, 2006).

En resumen, la comprensión y el abordaje de la variabilidad climática desde múltiples perspectivas son esenciales para garantizar la seguridad y la sostenibilidad a largo plazo de la sociedad humana frente a los desafíos climáticos en evolución.

Climatología urbana

La climatología urbana es un campo interdisciplinario de estudio que se adentra en la compleja interacción entre las ciudades y su atmósfera circundante. Enfocándose principalmente en las áreas urbanas, este campo integra una variedad de disciplinas, como meteorología, climatología, arquitectura e ingeniería, entre otras (Mills, 2014).

Desde hace décadas, se ha observado que las islas de calor urbanas, resultado directo de la climatología urbana, contribuyen al aumento de las temperaturas en las zonas urbanas en comparación con sus alrededores. Este fenómeno ha suscitado una creciente preocupación sobre el impacto del cambio climático en el confort térmico y el consumo energético necesario para mantenerlo (Singh *et al.*, 2014).

Los procesos generados por la actividad humana en entornos urbanos, como la construcción de estructuras y la planificación urbana, provocan cambios significativos en el clima de las ciudades. Sin embargo, estos cambios están influenciados por factores regionales, lo que destaca la importancia de distinguir entre el clima urbano y las influencias externas (Oke *et al.*, 2017).

El clima urbano se define como una variación regional del clima que ha sido alterada por la presen-



cia y la actividad de la ciudad. Su estudio implica comparaciones con entornos periurbanos o rurales para entender mejor las diferencias. Factores como el pavimento, las estructuras edificadas y el diseño de la red vial modifican los intercambios de radiación, lo que resulta en una mayor contaminación atmosférica y un aumento de las temperaturas en comparación con las áreas suburbanas (Fernández y Martilli, 2012).

Isla de Calor Urbana (ICU)

Efectos de la Isla de Calor Urbana (ICU)

La ICU se intensifica en zonas urbanas debido al efecto de la configuración urbana y la densidad de construcción. Esta dinámica conduce, especialmente en condiciones de estabilidad atmosférica, a un aumento de la temperatura en el centro de las ciudades en comparación con las áreas rurales circundantes (Oke *et al.*, 2017). Cuanto mayor es la diferencia de temperatura, más fuerte es el efecto de isla de calor urbana (figura 5).

La falta de áreas verdes y la canalización de cursos de agua en las ciudades contribuyen a la exacerbación de la ICU (Buyadi *et al.*, 2013). La escasez de amplias áreas verdes y la canalización de los cursos

de agua en la ciudad disminuyen las posibilidades de aprovechar la energía solar a través de procesos como la fotosíntesis o la evaporación del agua.

En ciudades con una población grande, la temperatura del aire puede aumentar significativamente debido a la ICU. En ciudades con más de un millón de habitantes, la temperatura promedio del aire anual puede aumentar entre 1 y 3°C (Kabisch *et al.*, 2023). Este fenómeno está afectado por la sustitución de áreas abiertas y vegetación por la construcción de carreteras, edificios y otras infraestructuras, lo que provoca cambios en las superficies permeables.

La configuración urbana, densidad de población y actividades humanas son factores clave que influyen en la aparición de la ICU. La intensidad de este fenómeno está directamente vinculada a las áreas con las densidades de construcción más elevadas y los volúmenes de edificaciones más grandes (Barrera Alarcón *et al.*, 2022). Esto se refleja en perfiles térmicos nocturnos donde las intensidades máximas de la Isla de Calor Urbana se registran en el centro de las áreas urbanas y disminuyen significativamente a medida que nos alejamos hacia la periferia de la ciudad (Barrera Alarcón *et al.*, 2022).

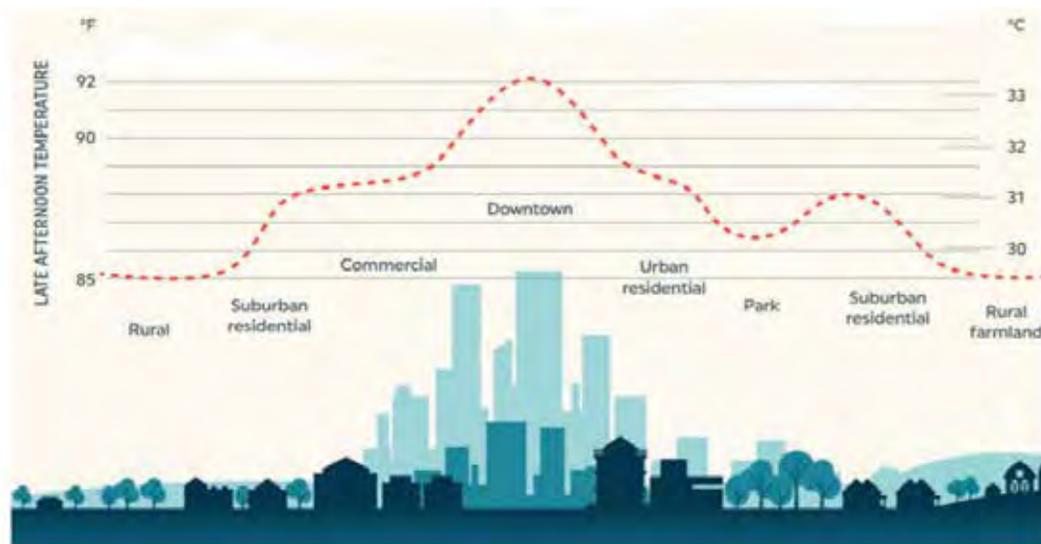


Figura 5. Mapa de islas de calor en las zonas urbanas. (Fuente: Imagen Lawrence Berkeley National Lab, 2019).



Factores que contribuyen a la formación de ICU

La geometría urbana, la actividad humana, los procesos físicos y los factores meteorológicos son determinantes en el balance energético y la generación de la ICU. Estos elementos determinan si una superficie se enfría o se calienta, dependiendo de su proporción y de las relaciones entre ellos (García, 1990; Erell *et al.*, 2011).

La absorción de radiación en entornos urbanos y la reducción de la pérdida de calor radiante durante la noche son factores significativos en la formación de la ICU. La absorción más pronunciada de radiación en entornos urbanos, la reducción de la pérdida de calor radiante durante la noche y el incremento en la radiación de onda larga, que es absorbida y emitida de nuevo hacia la superficie debido a la contaminación urbana, desempeñan un papel significativo en la generación de este fenómeno (Terjung, y Louie, 1973).

La presencia de edificios altos multiplica las reflexiones horizontales de la radiación, contribuyendo al efecto de la ICU (Taleb y Abu-Hijleh, 2013).

La influencia humana, incluida la urbanización y la combustión de combustibles, es un factor fundamental en la formación de la ICU. La aparición de la isla de calor se debe a la influencia de la climatología urbana, donde las áreas construidas proporcionan una mayor superficie para la absorción de calor, el cual se irradia lentamente durante la noche (Aguilar García, 2021). La aparición de fenómenos meteorológicos extremos y la alteración de variables climáticas locales son consecuencias directas de la ICU. La ICU también provoca alteraciones en la disposición espacial de otras variables, tales como la presión atmosférica, los patrones de viento, la cantidad de nubes y la lluvia, así como en la dispersión de contaminantes (Sánchez Rodríguez, 2013).

La urbanización causante de la isla de calor

Las Islas de Calor son fenómenos que provocan un aumento significativo de la temperatura local, resultando en un incremento considerable en el consumo de energía eléctrica por parte de los residen-

tes. Este aumento se atribuye al uso extensivo de sistemas de refrigeración y aire acondicionado, empleados para climatizar edificios y viviendas con el objetivo de proporcionar confort a sus habitantes. Sin embargo, este confort tiene un costo ambiental significativo. Con el aumento en el uso de energía eléctrica, se generan emisiones de gases contaminantes, tales como dióxido de azufre, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno (Tumini, 2010).

Las Islas de Calor se originan a partir de dos procesos distintos pero interrelacionados asociados a la urbanización (Villanueva *et al.*, 2013). El primero implica la sustitución del suelo natural por materiales como el asfalto y el concreto, resultado directo de la urbanización, lo que modifica las superficies naturales con elementos urbanos. El segundo proceso indica que las actividades urbanas, como el transporte y la industria, generan emisiones contaminantes que contribuyen al calentamiento de la ciudad.

El crecimiento urbano conlleva una serie de efectos en cadena, entre los que se incluyen la pérdida de espacios verdes, la reducción en la absorción de carbono, el incremento en la emisión de contaminantes atmosféricos, la impermeabilización de los suelos y la retención de calor en estructuras, superficies y la atmósfera, lo que propicia la formación de lo que se conoce como Islas de Calor. Es innegable que la urbanización representa una transformación drástica del entorno natural, y esta transformación tiene un impacto en los cambios a nivel global (IPCC, 2022).

Enfrentando el riesgo: isla de calor urbana y su relación con el cambio climático

El Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) define el riesgo como la combinación de la probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso relacionado con el clima y sus consecuencias adversas para los sistemas humanos y naturales. Este concepto engloba tanto la posibilidad de que ocurra un evento adverso como las potenciales pérdidas, daños o efectos negativos que podrían resultar de dicho evento. En el contexto del cambio cli-



mático, el término riesgo se utiliza principalmente en referencia a los riesgos de impactos climáticos (IPCC, 2022).

Las Islas de Calor son fenómenos que se consideran estrechamente relacionados con el cambio climático y representan un riesgo adicional en áreas urbanas. El cambio climático puede intensificar este efecto, aumentando las temperaturas urbanas y exacerbando los riesgos para la salud, especialmente durante olas de calor. (Organización Mundial de la Salud [OMS], 2021)

Las Islas de Calor Urbanas (ICU) intensas han adquirido el carácter de riesgo durante las olas de calor en las aglomeraciones urbanas de latitudes medias, al agravar las condiciones de calor excesivo en horario nocturno, con efectos nocivos en la salud de personas mayores o enfermas. La intensidad de estas Islas de Calor depende de varios factores, incluyendo la geografía, la urbanización, el tiempo y el clima (Martín-Vide *et al.*, 2016).

En resumen, las Islas de Calor Urbanas representan un riesgo significativo para la salud y el bienestar de la población urbana, especialmente en el contexto del cambio climático en el que las temperaturas extremas son cada vez más frecuentes. Es fundamental comprender y abordar estos riesgos para mitigar sus impactos adversos en los sistemas humanos y naturales.

Resultados de los estudios sobre las Islas de Calor Urbano (ICU) y estrés por calor

La intensidad de las Islas de Calor Urbano (ICU) ha sido objeto de diversos estudios en diferentes ciudades del mundo, revelando patrones interesantes y preocupantes en relación con el cambio climático y la urbanización. A continuación, se presentan algunos hallazgos destacados de investigaciones recientes:

- Análisis en Hannover, Alemania. Un estudio realizado en Hannover, Alemania, durante los años 2018, 2019 y 2020, reveló un incremento significativo en la intensidad de la ICU durante períodos de calor sin precedentes. Estos años se destacaron por ser algunos de los más

calurosos registrados en Alemania. (Müller *et al.*, 2021). Comparando con un año sin calor en 2017, se encontró que la intensidad de la ICU aumentó considerablemente durante los años de calor extremo, especialmente en las temperaturas mínimas nocturnas. El efecto de la ICU fue más pronunciado en áreas urbanas densamente construidas, mientras que las áreas con mayor cobertura vegetal, como un parque urbano, mostraron una menor intensidad de la ICU. Estos hallazgos resaltan la importancia de implementar estrategias de “ecologización” urbana, como aumentar la cantidad de espacios verdes y arbolados, para mitigar los efectos del calor en las áreas urbanas.

- **Impacto de Olas de Calor en Diferentes Ciudades.** Investigaciones en ciudades como Madison (EE.UU.), Melbourne y Adelaida (Australia), y Atenas (Grecia), confirmaron la intensificación de la ICU durante períodos de olas de calor. Se observó un aumento en la intensidad del efecto de Isla de Calor Urbano durante el día y la noche durante las olas de calor, con temperaturas máximas diarias particularmente elevadas. (Johnson *et al.*, 2020). Estos resultados destacan la necesidad de medidas adaptativas y de mitigación específicas para enfrentar el impacto de las olas de calor en entornos urbanos.
- **Tendencias de Urbanización y Expansión Urbana.** El crecimiento acelerado de las ciudades, especialmente en países como China, ha exacerbado el efecto de las Islas de Calor Urbano. Investigaciones han demostrado que la rápida expansión urbana ha contribuido significativamente al aumento del estrés por calor en áreas urbanas, como se evidencia en el caso de China. Es importante comprender y abordar los patrones de expansión urbana para mitigar los efectos negativos del calor en las ciudades en crecimiento. (Li y Zhang, 2019).
- **Desafíos y Futuras Investigaciones.** A pesar de los avances en la comprensión de la ICU, aún existen brechas en la investigación, como



la falta de estudios en entornos verticales y la necesidad de explorar la variabilidad espacio-temporal del estrés por calor en diferentes entornos urbanos. (Davis *et al.*, 2022). Futuras investigaciones deberían centrarse en identificar estrategias efectivas de adaptación y mitigación para reducir el impacto del calor urbano en la salud y el bienestar de los residentes.

Resultados de los estudios sobre las Islas de Calor Urbano (ICU) en zonas costeras

La investigación sobre las islas de calor urbanas en ciudades costeras revela patrones particulares debido a la influencia del mar y la variación estacional. Por ejemplo, en Bari, Italia, se ha observado que las características urbanas como la densidad y el uso del suelo modifican la intensidad del UHI. Las brisas marinas pueden mitigar las temperaturas durante el día, pero las áreas densamente urbanizadas experimentan UHI más intensos, especialmente en verano y de noche, con incrementos de hasta 4.8 °C (Kakumanu *et al.*, 2020).

En Dalian, China, se demostró que la UHI solo es significativa durante la primavera y el verano, mientras que en otoño e invierno no se observa un efecto notorio. La vegetación y la elevación juegan un papel importante en moderar las temperaturas, especialmente en los meses cálidos (Xiang *et al.*, 2021).

Por otro lado, en Brasil, ciudades como Manaus, Curitiba, y Campinas también han sido objeto de estudios. En particular, en Manaus, se ha utilizado teledetección para analizar la UHI (Santos *et al.*, 2018), mientras que en Campinas se ha investigado el impacto de la vegetación en el microclima urbano para contrarrestar la densificación urbana (Lima *et al.*, 2022). Estos estudios destacan la importancia de la vegetación y la morfología urbana para mitigar los efectos del calor.

Estos estudios evidencian que las UHI en zonas costeras están fuertemente influenciadas por factores locales como la proximidad al mar, la estacionalidad y la cobertura vegetal.

Métodos de investigación de las islas de calor urbana

Se han desarrollado varios métodos para investigar el efecto de las islas de calor urbano (UHI, por sus siglas en inglés), que incluyen el análisis de datos de observación meteorológica, la simulación numérica de meso escala con el modelo WRF y el análisis de imágenes de teledetección (Kabisch *et al.*, 2023). Entre ellos, las imágenes de teledetección se destacan en el estudio comparativo del efecto de UHI en diferentes etapas de desarrollo urbano. La teoría de la Zona Climática Local (LCZ), propuesta por Stewart y Oke (2012), proporciona una herramienta innovadora para la reducción de escala del efecto UHI y establece un esquema de clasificación sistemático para diferentes formas urbanas y paisajes de superficie.

Los métodos de investigación del efecto UHI abarcan análisis de datos meteorológicos, mediciones y análisis de campo, simulación numérica y teledetección. La teledetección, en particular, se utiliza ampliamente en el estudio comparativo del efecto UHI en diferentes períodos de desarrollo urbano, siendo parte de investigaciones a microescala. (Anderson *et al.*, 2020).

Las herramientas geoespaciales en el mapeo de UHI proporcionan datos avanzados de teledetección/aertransportados y análisis espaciales para procesar grandes conjuntos de datos de manera eficiente. Estas herramientas permiten investigar áreas espaciales más extensas con una gran cobertura temporal en comparación con los datos limitados de temperatura del aire disponibles en observatorios. (Jones y Smith, 2019).

Existen varios métodos y enfoques para analizar y mapear UHI, desde el uso tradicional de datos satelitales hasta metodologías emergentes como la teledetección, análisis espacial basado en SIG y sistemas aéreos no tripulados (UAS), que amplían las capacidades de mapeo y análisis. (Taylor *et al.*, 2021).

Un estudio realizado en la provincia urbanizada de Kayseri, Turquía, empleó imágenes satelitales Landsat 8 y Landsat 9 para investigar la evolución



de las temperaturas de la superficie terrestre (LST) y los efectos de UHI entre 2013 y 2022 (Peng *et al.*, 2024). Este estudio también analizó el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) y el Índice de Diferencia Normalizada de Construcción (NDBI), revelando correlaciones entre los cambios en LST, UHI, NDVI y NDBI. (Peng *et al.*, 2024).

Los estudios sobre UHI comúnmente utilizan imágenes satelitales de teledetección y técnicas de simulación para analizar y comprender este fenómeno urbano.

Las Islas de Calor Urbano (ICU) representan un desafío significativo en la planificación y gestión urbana, así como en la mitigación de los impactos del cambio climático. A través de una revisión exhaustiva de la literatura científica, se han identificado diversas metodologías de investigación que abordan este fenómeno en diferentes contextos geográficos y climáticos.

Uno de los hallazgos importantes de esta revisión es la variabilidad en la intensidad y la evolución de las ICU en diferentes áreas urbanas. Por ejemplo, el estudio realizado en Hannover, Alemania, destaca cómo las condiciones extremas de calor pueden exacerbar las ICU y sus efectos en el entorno urbano (Kabisch *et al.*, 2023). En contraste, investigaciones en nuevas áreas de expansión en ciudades chinas revelan patrones evolutivos diversificados de las ICU en relación con el crecimiento urbano (Peng *et al.*, 2024).

La relación entre las ICU, la contaminación del aire y la salud pública también ha sido objeto de análisis en diversos estudios. Un estudio aplicado en Granada, España, demuestra cómo el análisis espaciotemporal de la ICU, la contaminación del aire y los patrones de enfermedades puede proporcionar información valiosa para la planificación urbana y la salud pública (Hidalgo-García y Arco-Díaz, 2023). Del mismo modo, la evaluación del impacto del calentamiento urbano en el crecimiento de los árboles en las calles de Berlín destaca la interacción entre la vegetación urbana y las ICU (Hurley y Heinrich, 2024).

La mitigación de las ICU ha sido abordada a través de diversas estrategias y tecnologías innovadoras. Desde modelos de simulación paramétrica del microclima urbano en áreas antiguas de Dongshi Town, China, hasta la utilización de teledetección y aprendizaje automático para estimar la temperatura de la superficie terrestre en Yazd, Irán, se han explorado múltiples enfoques para comprender y mitigar las ICU (Huang *et al.*, 2024).

Además, se ha investigado el papel de la infraestructura verde en la reducción de las ICU. Estudios como el análisis espaciotemporal de la infraestructura verde en Granada, España, han demostrado cómo esta puede actuar como una medida efectiva de mitigación (Hidalgo García, 2023).

Asimismo, la comparación sistemática del impacto de diferentes medidas, como techos y paredes frescos, en la formación de las ICU resalta la importancia de la planificación urbana sostenible (Jiachen *et al.*, 2018).

En resumen, la investigación sobre las ICU ha avanzado significativamente en las últimas décadas, proporcionando insights valiosos para comprender este fenómeno complejo y desarrollar estrategias efectivas de mitigación en entornos urbanos.

Adaptación a las islas de calor

en la ciudad: perspectivas y estrategias

La adaptación al cambio climático, según el IPCC (2014, AR5), implica ajustarse a los efectos presentes o futuros del clima. Esto incluye la moderación o prevención de impactos negativos, así como el aprovechamiento de los efectos beneficiosos, mediante intervenciones tanto en sistemas humanos como naturales.

Investigaciones, como la de Okyere *et al.* (2019), han destacado que la adaptación al cambio climático implica anticipar, responder, minimizar consecuencias, recuperarse y aprovechar nuevas oportunidades.

Sin embargo, lograr una adaptación exitosa no solo depende de tener los recursos adecuados, sino también de la disposición y habilidad para trans-



formar esos recursos en acciones efectivas, como señala Cinner *et al.* (2018).

En el contexto específico de las ciudades, donde las islas de calor son un desafío evidente, estas perspectivas sobre la adaptación al cambio climático adquieren una importancia particular. En las áreas urbanas, la adaptación se convierte en una cuestión crítica para garantizar la calidad de vida de los residentes y la sostenibilidad de las comunidades.

La adaptación a las islas de calor en la ciudad no solo implica la implementación de medidas físicas para mitigar el calor, sino también la capacidad de las comunidades para adaptarse, aprovechando recursos y generando acciones efectivas frente a los desafíos del cambio climático. (Cinner *et al.*, 2018).

Las islas de calor urbanas (ICU) representan un desafío cada vez más relevante en el contexto de las ciudades modernas, donde el aumento de las temperaturas y la variabilidad climática plantean preocupaciones significativas para la salud pública, el medio ambiente y la calidad de vida de los residentes urbanos. A través de la revisión y síntesis de investigaciones recientes, se exploran en este artículo diversas estrategias de adaptación diseñadas para mitigar el impacto de las ICU y promover entornos urbanos más sostenibles y resistentes al calor. (Smith, *et al.*, 2023).

La variabilidad de estrés térmico en ciudades como Sevilla (España) ha sido objeto de estudio en investigaciones como la realizada por Hidalgo-García, y Rezapouraghdam (2023). Esta investigación propone una serie de medidas de mitigación basadas en el modelo climático UrbClim, destacando la importancia de estrategias específicas adaptadas a las condiciones locales. Por otro lado, estudios exploran estrategias de adaptación al calor en ciudades de gran envergadura en Estados Unidos, evaluando su efectividad bajo diferentes escenarios futuros.

La intensidad de las ICU y su relación con las temperaturas urbanas se ha examinado exhaustivamente diversas investigaciones (Wang *et al.*, 2023). Este análisis sintetiza el entorno térmico urbano en

mega regiones, proporcionando información valiosa para el diseño de estrategias de mitigación. Además, la innovación en materiales de construcción, como los materiales de cambio de fase (MCP), ha sido objeto de investigación en estudios como el presentado por (Asadi, 2023), explorando su potencial para mitigar las ICU mediante la regulación térmica en pavimentos de hormigón.

En el ámbito de la infraestructura urbana, soluciones como los pavimentos permeables están siendo investigadas por su capacidad para mitigar las ICU y mejorar el rendimiento hidrológico, como se muestra en el estudio piloto realizado por Liu y Morawska, (2020). A su vez, investigaciones como la llevada a cabo en Phoenix, Arizona (Liu, 2020) utilizan modelos para evaluar el impacto de diversas estrategias de mitigación en la morbilidad relacionada con el calor, ofreciendo información importante para la planificación urbana y la gestión de la salud pública.

La reconfiguración de espacios urbanos, como parques y áreas verdes, emerge como una estrategia prometedora para mitigar las ICU de manera natural, como se destaca en el estudio presentado por Barradas *et al.* (2022). Este enfoque resalta la importancia del diseño urbano para maximizar los beneficios ambientales y la resiliencia ante el calor. Por último, investigaciones como la realizada en la ciudad de Mekelle, Etiopía, por Hidalgo García (2023), exploran la relación entre las ICU y la ecología urbana, proporcionando una visión integral de los efectos del calor urbano en el entorno natural y construido.

En conjunto, estas investigaciones subrayan la diversidad de enfoques y estrategias disponibles para abordar las ICU en entornos urbanos, destacando la necesidad de enfoques integrales y adaptados a las condiciones locales para promover ciudades más saludables, sostenibles y resilientes al calor.

Mitigación de las Islas de Calor Urbanas:

Estrategias Efectivas para un Futuro Sostenible
La mitigación de los impactos derivados de eventos o situaciones adversas es esencial para proteger



tanto a la población como al entorno afectado. Esta estrategia, estrechamente vinculada con la adaptación, busca reducir los efectos negativos y minimizar los riesgos asociados.

Un aspecto importante de la mitigación se centra en las medidas térmicas, las cuales desempeñan un papel fundamental en la mejora de la calidad de vida de los residentes urbanos y en el avance hacia un desarrollo sostenible. La implementación de proyectos, procedimientos y estrategias específicamente diseñados para abordar las necesidades de una población o región particular es clave para lograr resultados efectivos (Godínez, 2018).

Investigaciones recientes, como la de Hong *et al.* (2023), destacan la importancia de estas medidas térmicas en el contexto urbano. Su estudio destaca la relevancia de adoptar estrategias de mitigación adecuadas para preservar el bienestar de los ciudadanos y promover un crecimiento urbano sostenible.

Las Islas de Calor Urbanas (ICU) representan uno de los desafíos más apremiantes para las ciudades modernas, con efectos adversos en la salud pública, el consumo de energía y el medio ambiente. Sin embargo, a medida que la comprensión de estos fenómenos ha evolucionado, también lo han hecho las estrategias de mitigación.

Una de las estrategias más prometedoras identificadas es el uso de vegetación y el aumento del albedo. Estudios como “*Estimating the effects of vegetation and increased albedo on the urban heat island effect with spatial causal inference*” y “*Green Infrastructure as an Urban Heat Island Mitigation Strategy—A Review*” (Pritipadmaja y Sharma, 2023) resaltan cómo la vegetación y superficies reflectantes pueden reducir significativamente la temperatura urbana, mejorando así la calidad de vida de los residentes y reduciendo la demanda energética.

Además, la optimización de espacios verdes urbanos, como se describe en “*Localizing and prioritizing roof greening opportunities for urban heat island mitigation: insights from the city of Krefeld, Germany*” (Calhoun *et al.*, 2024) y la implementación de infraestructura verde, como humedales

construidos, se ha demostrado que también son eficaces en la mitigación de las ICU (Cheela *et al.*, 2021).

La reflectividad solar de los materiales de la envolvente de los edificios emerge como otro enfoque valioso. Investigaciones como “*Increasing Solar Reflectivity of Building Envelope Materials to Mitigate Urban Heat Islands: State-of-the-Art Review*” (Xiang, y Tao, 2023) y “*Retroreflective façades for urban heat island mitigation: Experimental investigation and energy evaluations*” (Small, 2020) destacan cómo los materiales de construcción reflectantes pueden reducir la absorción de calor y mitigar los efectos de las ICU.

La combinación de estrategias pasivas, como techos verdes, y activas, como pavimentos reflectantes, emerge como una solución integral para abordar las ICU. Es esencial considerar los beneficios adicionales, como la mejora de la calidad del aire y la biodiversidad urbana, al implementar estas medidas (Araque *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2024;).

A medida que avanzamos hacia un futuro más sostenible, es imperativo adoptar enfoques multifacéticos y basados en evidencia para abordar las ICU. Este artículo destaca la importancia de la colaboración entre investigadores, urbanistas y responsables políticos para implementar soluciones efectivas que mejoren la resiliencia urbana y la calidad de vida de los habitantes de las ciudades.

Tecnología y materiales de construcción

Las Islas de Calor Urbanas (ICU) representan un desafío cada vez más urgente en un mundo marcado por el cambio climático y la rápida urbanización. Sin embargo, a medida que la conciencia sobre este fenómeno crece, también lo hace la investigación y el desarrollo de estrategias para mitigar sus efectos adversos en la calidad de vida urbana. A través de una revisión exhaustiva de la literatura científica actual, se han identificado y analizado diez estudios clave que exploran diversas tecnologías y materiales de construcción con el objetivo de combatir las ICU y mejorar el confort térmico en entornos urbanos.



Los resultados revelan una amplia gama de enfoques y soluciones potenciales:

- **Infraestructuras verdes mejoradas.** Se ha demostrado que estas infraestructuras son eficaces para reducir las temperaturas en entornos urbanos desérticos, ofreciendo una solución prometedora para mitigar las ICU en regiones afectadas por el calor extremo (Mohammed *et al.*, 2023) (figura 6).
- **Planificación urbana sostenible.** La densidad y morfología urbana tienen un impacto significativo en la intensidad de las ICU. Por lo tanto, estrategias de planificación que promuevan un diseño urbano más equilibrado y verde pueden contribuir a mitigar este fenómeno (Li *et al.*, 2020).
- **Energías renovables y techos frescos.** En lugares como Ahmedabad, India, se identifican oportunidades para utilizar energías renovables y techos frescos como medios efectivos para reducir la demanda de refrigeración y combatir el aumento de las temperaturas (Joshi *et al.*, 2022).
- **Reflectividad solar de materiales de construcción.** La utilización de materiales de envolvente de edificios con alta reflectividad solar puede ayudar a reducir la absorción de calor y mitigar las ICU de manera efectiva (Ziaemehr *et al.*, 2023).



Figura 6. Una "sala de estar verde" en Frankfurt.
Fuente: PNUMA/Irene Fagotto (2021)

- **Pavimentación urbana con materiales fríos.** La selección de materiales fríos para pavimentación urbana puede contribuir significativamente a la reducción de las temperaturas en áreas urbanas, mejorando así el confort térmico de los habitantes (Castro *et al.*, 2017).
- **Diseño sostenible de fachadas de edificios.** El diseño adecuado de las fachadas de los edificios puede influir en el microclima exterior y, por ende, en la formación de las ICU, destacando la importancia de estrategias de diseño sostenible (Fox *et al.*, 2018).
- **Pinturas frescas en la morfología urbana.** Las pinturas frescas muestran un potencial significativo para reducir las temperaturas en áreas urbanas densamente construidas, según lo demostrado por la modelización de su efecto mitigador en la morfología urbana realista (Liu y Morawska, 2018).
- **Simulaciones de interacciones térmicas a microescala:** Las simulaciones de estas interacciones proporcionan información valiosa para el diseño de estrategias de mitigación de las ICU a nivel local, contribuyendo así a un enfoque más preciso y eficaz en la lucha contra este fenómeno (Chatterjee *et al.*, 2019).

En conjunto, estos estudios resaltan la diversidad de enfoques y soluciones disponibles para abordar las Islas de Calor Urbanas mediante tecnologías y materiales de construcción innovadores. Sin embargo, se hace evidente la necesidad de una acción coordinada y una mayor investigación para implementar estas soluciones de manera efectiva y maximizar su impacto en la sostenibilidad urbana.

Políticas y planificación urbana en la era del Cambio Climático

La planificación urbana y las políticas de desarrollo sostenible juegan un papel importante en la creación de ciudades resilientes frente al cambio climático. Esta revisión sistemática analiza la intersección entre políticas, planificación urbana y medidas de mitigación/adaptación al cambio climático, explorando estudios académicos relevantes en el campo.



El análisis de diversos estudios relacionados con políticas y planificación urbana en el contexto de las islas de calor urbano ofrece una comprensión integral sobre cómo abordar este fenómeno en entornos urbanos. Estos estudios proporcionan una variedad de enfoques y estrategias para mitigar los efectos de las islas de calor, promoviendo así ciudades más frescas y habitables en el contexto del cambio climático.

Al considerar tanto aspectos técnicos como políticos en los esfuerzos de mitigación y adaptación al cambio climático, se resalta la importancia de políticas que aborden tanto el diseño urbano como las emisiones de gases de efecto invernadero.

La integración de la naturaleza en el diseño urbano se revela como una estrategia efectiva para mitigar las islas de calor, creando áreas verdes, corredores de vegetación y espacios públicos frescos que ayuden a reducir la temperatura urbana. (Dabaieh, *et al.*, 2022).

El potencial de las soluciones basadas en la naturaleza para abordar las islas de calor urbano es destacado, promoviendo la circulación de aire fresco y la absorción de calor a través de la vegetación y áreas verdes dentro de las ciudades (Catalano *et al.*, 2021).

La importancia de integrar la infraestructura verde en la planificación espacial urbana para mitigar los efectos del cambio climático es subrayada, incluyendo la reducción de las islas de calor a través de la plantación de árboles y la creación de parques y jardines (Atanasova *et al.*, 2021).

Examinando la relación entre el uso de la tierra verde y las islas de calor urbanas en ciudades europeas, se proporciona información valiosa para desarrollar políticas y estrategias de planificación urbana que promuevan entornos más frescos y sostenibles (Elgendawy *et al.*, 2020).

Finalmente, se ofrece un marco para evaluar la calidad de los planes urbanos en términos de consideraciones sobre las islas de calor urbano, orientando la planificación hacia ciudades más frescas y habitables.

En conjunto, estos estudios destacan la impor-

tancia de integrar estrategias de mitigación de islas de calor urbano en las políticas y planificación urbana, promoviendo un enfoque holístico que incorpore tanto la infraestructura verde como las soluciones basadas en la naturaleza para crear ciudades más frescas y resilientes al cambio climático.

Técnicas de modelado y simulación

Para analizar y comprender los resultados de las técnicas de modelado y simulación de islas de calor, se revisaron diversos estudios que abarcan diferentes aspectos relacionados con el tema. En primer lugar, el estudio realizado en Yazd, Irán (Mansourmoghadam *et al.*, 2024), se centró en la modelización y estimación de la temperatura de la superficie terrestre utilizando teledetección y aprendizaje automático. Este estudio proporcionó información valiosa sobre cómo estas tecnologías pueden ser aplicadas para comprender las variaciones de temperatura en áreas urbanas, específicamente en una región con características climáticas particulares.

Por otro lado, el análisis espacio-temporal de la temperatura de la superficie terrestre, el efecto isla de calor urbano y los puntos calientes urbanos en Andalucía, España (García, y Díaz, 2023), arrojó luz sobre las relaciones entre estos fenómenos y las variaciones en el campo térmico. Este estudio proporcionó una visión más amplia de cómo factores geográficos y temporales influyen en la distribución de la temperatura en entornos urbanos.

Además, se investigaron las relaciones entre diferentes espacios verdes urbanos y las zonas climáticas locales (Kirschner *et al.*, 2023), lo que ayudó a comprender cómo la vegetación puede influir en la mitigación del calor urbano. Un estudio piloto en Shenyang, Noreste de China (Miao *et al.*, 2023), exploró cómo la calidad del aire exterior se puede vincular con el confort térmico en presencia de árboles en la calle, lo que sugiere posibles estrategias para mejorar la calidad del aire y el confort térmico en entornos urbanos.

Asimismo, se examinó la evolución diurna de la temperatura de los árboles urbanos a escala de ciudad (Vo Hu, 2021), lo que proporcionó infor-



mación detallada sobre cómo estos elementos contribuyen a la regulación térmica en entornos urbanos. Un modelo de árbol único fue desarrollado para simular de manera consistente la capacidad de enfriamiento, sombreado y captación de contaminantes de los árboles urbanos (Pace, et. al., 2021), lo que ofrece una herramienta importante para la planificación urbana orientada a la mitigación del calor.

Finalmente, la complejización del césped urbano se exploró como una estrategia para mejorar la mi-

tigación del calor y la biodiversidad de artrópodos (Francoeur *et al.*, 2021), destacando el papel importante de los elementos naturales en la adaptación de las ciudades al cambio climático.

En conjunto, estos estudios proporcionan una comprensión más completa de las técnicas de modelado y simulación de islas de calor, así como de las estrategias para mitigar sus efectos en entornos urbanos, lo que puede ser fundamental para informar políticas y prácticas de planificación urbana sostenible.

Discusión

El análisis sistemático de las Islas de Calor Urbano (ICU) en el contexto del cambio climático y las medidas de adaptación y mitigación resalta la complejidad y la interdependencia de múltiples factores. Se destaca cómo la urbanización en aumento, combinada con el cambio climático, está exacerbando los efectos adversos de las ICU en la salud y el bienestar de las comunidades urbanas. (Kim y Brown, 2021)

Investigaciones recientes han demostrado que la geometría de la ciudad, incluyendo la distribución de edificios y la altura de estos, puede influir significativamente en la magnitud de las ICU. Por ejemplo, las ciudades con una alta densidad de rascacielos tienden a experimentar mayores temperaturas urbanas debido a la reducida ventilación y mayor absorción de calor en comparación con las ciudades con una distribución más dispersa de edificios. (Parsaee *et al.*, 2019). La radiación solar también desempeña un papel fundamental en la formación de las ICU. Las superficies urbanas, como el asfalto y el concreto, absorben gran parte de la radiación solar durante el día y liberan ese calor gradualmente durante la noche, contribuyendo así al calentamiento urbano. Este fenómeno se ve agravado por la presencia de contaminantes atmosféricos, como los gases de efecto invernadero y los aerosoles, que pueden atrapar el calor y aumentar aún más las temperaturas locales. (Degirmenci *et al.*, 2021)

Además, la actividad industrial y las emisiones de vehículos también contribuyen significativamente al calentamiento urbano al liberar calor directamente en la atmósfera y aumentar la concentración de contaminantes que absorben la radiación solar. (Peng *et al.*, 2024)

Se subraya la importancia de comprender los diversos factores que contribuyen a la formación de las ICU; desde la configuración urbana y la densidad de construcción hasta la falta de áreas verdes y la actividad humana, cada elemento desempeña un papel muy importante. La intensificación de las temperaturas en las zonas urbanas, en comparación con las áreas rurales circundantes, resalta la necesidad urgente de abordar este fenómeno. (Kim y Brown, 2021)

Se reconoce la eficacia de diversas estrategias de mitigación y adaptación, como la ecologización de techos y la pavimentación reflectante, en la reducción de la temperatura urbana y la mejora del confort térmico. Sin embargo, se enfatiza que estas medidas son solo parte de la solución. La implementación efectiva de políticas y acciones coordinadas es importante para enfrentar los desafíos complejos asociados con las ICU en el contexto del cambio climático. (Parsaee *et al.*, 2019).

El llamado a la acción se centra en la necesidad continua de investigación e innovación para promover ciudades más sostenibles y resilientes. Esto



incluye no solo la exploración de nuevas tecnologías y materiales de construcción, sino también la promoción de prácticas de planificación urbana que integren la resiliencia climática desde el principio. Al hacerlo, podemos trabajar hacia un futuro

donde las comunidades urbanas estén mejor preparadas para enfrentar los desafíos del calentamiento urbano y el cambio climático. (Degirmenci *et al.*, 2021).

Conclusiones

Este estudio de revisión sistemática ha resaltado la creciente preocupación por los efectos del calentamiento global en entornos urbanos. Los resultados subrayan la necesidad apremiante de estrategias efectivas para mitigar el impacto de las condiciones térmicas extremas en las áreas urbanas. Las medidas de adaptación identificadas, como el incremento de áreas verdes y la implementación de políticas de diseño urbano sostenible, muestran un potencial prometedor para abordar esta problemática. Sin embargo, es importante reconocer la necesidad de una investigación continua para evaluar la eficacia y la viabilidad de estas medidas en diferentes contextos urbanos y climáticos. Se debe prestar espe-

cial atención a la equidad en la distribución de estas soluciones, asegurando que todas las comunidades urbanas, especialmente aquellas en situación de vulnerabilidad, se beneficien de manera equitativa. Estas conclusiones resaltan la importancia de abordar los problemas derivados del cambio climático de manera proactiva y coordinada, tanto a nivel local como global, para garantizar la resiliencia y sostenibilidad de nuestras ciudades en el futuro. Además, se hace evidente la necesidad de políticas integrales que aborden tanto la mitigación como la adaptación al cambio climático, reconociendo la interconexión de estos aspectos para lograr un desarrollo urbano verdaderamente sostenible.

Referencias

- Abatzoglou, J. T., and R. Barbero (2014), Observed and projected changes in absolute temperature records across the contiguous United States, *Geophys. Res. Lett.*, 41, 6501–6508, doi:10.1002/2014GL061441.
- Aguilar García, E. A. (2021). Análisis de la distribución e intensidad de las islas de calor urbanas superficiales diurnas (ICUs) en el Cantón Manta, Manabí y su relación con la vegetación local y otras variables geográficas.
- Anderson, P., Johnson, R., y Lee, C. (2020). Urban Heat Island effect: Methods of investigation. *Journal of Environmental Research*, 85(3), 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109642>
- Araque, K.; Palacios, P.; Mora, D.; Chen Austin, M. (2021). Biomimicry-Based Strategies for Urban Heat Island Mitigation: A Numerical Case Study under Tropical Climate. *Biomimetics*, 6, 48. <https://doi.org/10.3390/biomimetics6030048>
- Argenal, F. (2010). Variabilidad climática y cambio climático en Honduras. Tegucigalpa: PNUD.
- Asadi, I. *et al.* (2023) Reviewing the Potential of Phase Change Materials in Concrete Pavements for Anti-Freezing Capabilities and Urban Heat Island Mitigation. *Buildings*, 13, 3072. <https://doi.org/10.3390/buildings13123072>
- Atanasova, N., Castellar, J.A., Pineda-Martos, R. et al. (2021). Nature-Based Solutions and Circularity in Cities. *Circ. Econ.Sust.* 1, 319–332. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00024-1>
- Balany, F. et al. (2020) Green Infrastructure as an Urban Heat Island Mitigation Strategy—A Review. *Water*, 12, 3577. <https://doi.org/10.3390/w12123577>
- Barradas, V.L.; Miranda, J.A.; Esperón-Rodríguez, M.; Ballinas, M. (2022). (Re) Designing Urban Parks to Maximize Urban Heat Island Mitigation by Natural Means. *Forests*, 13, 1143. <https://doi.org/10.3390/f13071143>
- Barrera Alarcón, I. G., Caudillo Cos, C. A., Medina Fernández, S. L., Ávila Jiménez, F. G., & Montejano Escamilla, J. A. (2022). La isla de calor urbano superficial y su manifestación en la estructura urbana de la Ciudad de México. *Revista de Ciencias Tecnológicas*, 5(3). Recuperado de scielo.org.mx
- Beever, E.A. *et al.* (2010), Testing alternative models of climate-mediated extirpations. *Ecological Applications*, 20: 164–178. <https://doi.org/10.1890/08-1011.1>



- Behera, S. K. (Ed.). (2020). *Interacciones aire-mar tropicales y extratropicales: Modos de variaciones climáticas*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2018-0-03022-4>
- Bonafoni, S. (2016). Remote sensing and thermal islands. In *Thermal Remote Sensing in Land Surface Processes* (pp. 133-148). Springer, Cham.
- Bonafoni, S., y Keeratikasikorn, C. (2018). An Urban Heat Island study by satellite imagery: A case study in Bangkok, Thailand. *Applied Geography*, 98, 15-24.
- Borsani, M. S. (2011). Materiales ecológicos: estrategias, alcance y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles.
- Buhr, B. *et al.* (2018). Climate change and the cost of capital in developing countries.
- Calhoun, Z.D., Willard, F., Ge, C. *et al.* Estimating the effects of vegetation and increased albedo on the urban heat island effect with spatial causal inference. *Sci Rep* 14, 540 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-50981-w>
- Camacho Dávila, M., y López Baños, Y. (2022) Infraestructura verde para mitigar las Islas de calor en las áreas urbanas: El caso de la ciudad de Toluca.
- Castro, L. C. *et al.* (2017). Evaluation of the thermal performance of different cold materials for urban paving. *Cerámica*, 63(366), 203–209. <https://doi.org/10.1590/0366-69132017633662063>
- Catalano, C., Meslec, M., Boileau, J. *et al.* (2021). Smart Sustainable Cities of the New Millennium: Towards Design for Nature. *Circ.Econ.Sust.* 1, 1053–1086. <https://doi.org/10.1007/s43615-021-00100-6>
- CECH, I. *et al.* (1976): “Relative contribution of land uses to the urban heat problem in the coastal subtropics.”; *Weather*, 42 (9); págs. 9-18.
- Centro de Consultoría Estratégica de la Academia China de Ingeniería. (2020). [Strategic Consultancy Center of the Chinese Academy of Engineering]. Retrieved from <http://www.cae.cn/cae/html/main/colys/95225123.html>
- CEPAL. (2014). Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en América Latina y el Caribe. https://www.euroclima.org/images/Publicaciones/Vulnerabilidad/CA-BID-Vulnerabilidad_y_adaptacion_al_cambio_climatico.pdf
- CEPAL. (2019). Cambio climático y desarrollo sostenible en América Latina y el Caribe: una revisión de experiencias recientes. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/45677/1/S1900711_es.pdf
- Cheela, V.R.S. *et al.* (2021). Combating Urban Heat Island Effect—A Review of Reflective Pavements and Tree Shading Strategies. *Buildings*, 11, 93. <https://doi.org/10.3390/buildings11030093>
- Chen, B. *et al.* (2024). The evolution of social-ecological system interactions and their impact on the urban thermal environment. *NPJ Urban Sustain*, 4, 3. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00141-4>
- Chi, H., Wu, Y., Zheng, H. *et al.* Patrones espaciales del cambio climático y peligros climáticos asociados en el noroeste de China. *Representante Científico*, 13, 10418 (2023). <https://doi.org/10.1038/s41598-023-37349-w>
- Cifuentes-Jara, M., Brenes, R., Brenes, C., Corrales, L., Vargas, M., Betbeder, J., *et al.* (2021). Islas de calor y regulación de la temperatura en la ciudad: Rol de los espacios verdes.
- Cinner, J. E., Adger, W. N., Allison, E. H., Barnes, M. L., Brown, K., Cohen, P. J., *et al.* (2018). Building adaptive capacity to climate change in tropical coastal communities. *Nature Climate Change*, 8(2), 117-123. <https://doi.org/10.1038/s41558-017-0065-x>
- Dabaieh, M., Maguid, D., Abodeeb, R., *et al.* (2022). The Practice and Politics of Urban Climate Change Mitigation and Adaptation Efforts: The Case of Cairo. *Urban Forum*, 33, 83–106. <https://doi.org/10.1007/s12132-021-09444-6>
- Davis, R., Green, S., & Thompson, P. (2022). Futuras direcciones en la investigación sobre Islas de Calor Urbano: Desafíos y oportunidades. *Climate Research*, 53(2), 124-139. <https://doi.org/10.3354/cr022124de>
- Cambio Climático, O. E. (2006). Plan nacional de adaptación al cambio climático. Oficina Española de Cambio Climático. Torreguil, España.
- de Campeche, G. C. D. E. (2015). Programa estatal de acción ante el cambio climático. Visión 2015-2030.
- Degirmenci, K., Desouza, K., Fieuw, W., Watson, R., & Yigitcanlar, T. (2021). Understanding policy and technology responses in mitigating urban heat islands: A literature review and directions for future research. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102873. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102873>
- Donat, M. G., & Coautores. (2013). Análisis actualizados de índices extremos de temperatura y precipitación desde principios del siglo XX: el conjunto de datos HadEX2. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 2098–2118. doi:10.1002/jgrd.50150
- Dong, X., Xie, Y., Sun, Z., & Zhan, C. (2011). A review on urban heat island effect research. *Acta Ecologica Sinica*, 31(3), 133-138.
- Eguarte, A., Hidalgo, J., Centeno, R., Álvarez, A., & Vázquez, R. (2014). Actualización de los escenarios de cambio climático para estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación en México y Centroamérica.
- Elgendawy, A., Davies, P., & Chang, H. (2020). Planning for cooler cities: A plan quality evaluation for Urban Heat Island consideration. *Journal of Urban Planning and Development*, 146(4), 531-553. <https://doi.org/10.1080/1523908X.2020.1781605>
- Ember, C. R., Ringen, E. J., Dunnington, J., & Pitek, E. (2020). Estrés por los recursos y diversificación de la subsistencia en las sociedades. *Nature Sustainability*, 3, 737-745. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2023.11.005>
- Fernández, F., & Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su impacto en la planificación. *Revista de Estudios Urbanos*, 45(3), 123-145.
- Fox, J., Osmond, P., & Peters, A. (2018). The Effect of Building Facades on Outdoor Microclimate—Reflectance Recovery from Terrestrial Multispectral Images Using a



- Robust Empirical Line Method. *Climate*, 6, 56. <https://doi.org/10.3390/cli6030056>
- Francoeur, X. W., Dagenais, D., Paquette, A., Dupras, J., Messier, C., et al. (2021). Complexifying the urban lawn improves heat mitigation and arthropod biodiversity. *Urban Forestry & Urban Greening*, 60, 127007. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2021.127007>
- Fuentes, V. B. (1994). La Isla de calor y los usos del suelo en Guadalajara. *Serie Geográfica*, 4, 83-97.
- Galindo Estrada, I. G. (2010). Identificación y estudios de las Islas urbanas de calor de las ciudades de Guadalajara y Colima. Propuestas de estrategias de mitigación. *Documents/8-IgnacioGalindo*.
- Galloa, K. P., Owenb, T. W., & Huber, A. H. (1993). Satellite-based modeling of urban heat islands. *Remote Sensing of Environment*, 44(2-3), 187-196.
- García Haro, A. (2017). Isla de frío de los parques urbanos: una aproximación desde el estudio de la influencia climática de los parques urbanos en Barcelona (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).
- García, D. H., & Díaz, J. A. (2023). Space-time analysis of the earth's surface temperature, surface urban heat island and urban hotspot: relationships with variation of the thermal field in Andalusia (Spain). *Urban Ecosyst*, 26, 525-546. <https://doi.org/10.1007/s11252-022-01321-9>
- García, F. F. (2009). Ciudad y cambio climático: aspectos generales y aplicación al área metropolitana de Madrid. *Investigaciones Geográficas* (España), (49), 173-195.
- García, F. F., & Martilli, A. (2012). El clima urbano: aspectos generales y su aplicación en el área de Madrid. *Revista Índice*, (50), 21-24.
- Giannaros, T. M., Melas, D., y Georgiou, S. E. (2013). The performance of the Weather Research and Forecasting Model in capturing urban-induced circulation: A case study for Athens, Greece. *Atmospheric Research*, 124, 29-47.
- Giorgi, F., y Gutowski Jr, W. J. (2015). Regional dynamical downscaling and the CORDEX initiative. *Annual review of environment and resources*, 40, págs.467-490.
- Godínez, T. Y. H. (2018). Caracterización de los efectos de la Isla de calor en la Delegación Venustiano Carranza, Ciudad de México.
- Gómez, S. C. Z., et. al (2023). El impacto de la arborización como estrategia de mitigación de la Isla de calor urbana en el Caribe colombiano. *Revista Científica de Arquitectura y Urbanismo*, 44(2), págs.34-41.
- Grimm NB, et al. (2008) Global change and the ecology of cities. *Science* 319:756-760. <https://doi.org/10.1126/science.1150195>
- Hegerl, G. C., Brönnimann, S., Schurer, A., y Cowan, T. (2018). El calentamiento de principios del siglo XX: anomalías, causas y consecuencias. *WIREs Climate Change*, 9, e522. <https://doi.org/10.1002/wcc.522>
- Henríquez, C., Smith, P., Contreras San Martín, P., y Qiüense, J. (2021). Variación en la intensidad de la Isla de calor urbana por efecto del cambio climático en ciudades chilenas. *Geographicalia*, 73: 133-154.
- Hernández, M. A., Cantin García, S., Lopez Abejon, N., y Rodríguez Zazo, M. (2010). Estudio de encuestas. *Estudio de Encuestas*, 100.
- Hidalgo García, D. (2023). Spatio-temporal analysis of the urban green infrastructure of the city of Granada (Spain) as a heat mitigation measure using high-resolution images Sentinel 3. *Urban Forestry and Urban Greening*, 87, 128061. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2023.128061>
- Hidalgo-García, D., & Arco-Díaz, J. (2023). Spatiotemporal analysis of the surface urban heat island (SUHI), air pollution and disease pattern: an applied study on the city of Granada (Spain). *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 30, 57617-57637. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-26564-7>
- Hidalgo-García, D., & Rezapouraghdam, H. (2023). Variability of heat stress using the UrbClim climate model in the city of Seville (Spain): mitigation proposal. *Environ Monit Assess.*, 195, 1164. <https://doi.org/10.1007/s10661-023-11768-8>
- Hong, C., Wang, Y., & Gu, Z. (2023). How to understand the heat island effects in high-rise compact urban canopy? *City Built Environ.*, 1(2). <https://doi.org/10.1007/s44213-022-00002-9>
- How Jin Aik, L., See, L., & He, J. (2020). Land use land cover and surface temperature changes in rapidly urbanizing Asian cities: A case study in Kuala Lumpur, Malaysia. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 9(1), 8. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118938>
- Huang, Y., Tu, R., Tuerxun, W., Jia, X., Zhang, X., & Chen, X. (2024). A Community Information Model and Wind Environment Parametric Simulation System for Old Urban Area Microclimate Optimization: A Case Study of Dongshi Town, China. *Buildings*, 14(3), 832. <https://doi.org/10.3390/buildings14030832>
- Hurley, A. G., & Heinrich, I. (2024). Assessing urban-heating impact on street tree growth in Berlin with open inventory and environmental data. *Urban Ecosyst*, 27, 359-375. <https://doi.org/10.1007/s11252-023-01450-9>
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- Johnson, P., Lee, H., Brown, M., & Smith, T. (2020). Impacto de las olas de calor en la intensificación de la Isla de Calor Urbano en ciudades globales. *International Journal of Climatology*, 40(5): 2158-2172. <https://doi.org/10.1002/joc.6325>
- Jones, M., & Smith, A. (2019). Geospatial tools in Urban Heat Island mapping: Advances in remote sensing and spatial analysis. *Geographical Analysis*, 51(2): 198-210. <https://doi.org/10.1111/gean.12189>
- Joshi, J., Magal, A., Limaye, V. S., et al. (2022). Climate change and 2030 cooling demand in Ahmedabad, In-



- dia: opportunities for expansion of renewable energy and cool roofs. *Mitig Adapt Strateg Glob Change*, 27, 44. <https://doi.org/10.1007/s11027-022-10019-4>
- Kabisch, N., Remahne, F., Ilsemann, C., et al. (2023). La isla de calor urbana en condiciones de calor extremas: un estudio de caso de Hannover, Alemania. *Representante científico*, 13, 23017. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49058-5>
- Kakumanu, K., Paudel, S., & Hsu, K. (2020). Urban Heat Island Effect and the Impact of Urbanization on Land Surface Temperature in Bari, Italy. *Remote Sensing*, 12(15), 2467. <https://doi.org/10.3390/rs12152467>
- Kim, S. W., & Brown, R. D. (2021). Urban heat island (UHI) intensity and magnitude estimations: A systematic literature review. *Science of The Total Environment*, 779, 146389. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146389>
- Kirschner, V., Macků, K., Moravec, D., et al. (2023). Measuring the relationships between various urban green spaces and local climate zones. *Sci. Rep.*, 13, 9799. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36850-6>
- Landa, R., Magaña, V., y Neri, C. (2008). Agua y clima: elementos para la adaptación al cambio climático (No. Sirsi a453952). Semarnat.
- Li, X., y Zhang, Y. (2019). Crecimiento urbano y estrés térmico en ciudades chinas: Un análisis de las tendencias recientes. *Environmental Research Letters*, 14(7), 073001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2f7d>
- Li, Y., Schubert, S., Kropp, J.P., et al. (2020). On the influence of density and morphology on the Urban Heat Island intensity. *Nature Communications*, 11, 2647. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16461-9>
- Lima, D. D. P., Oliveira, R. F., & da Silva, A. G. (2022). Urban vegetation and its influence on the microclimate in Campinas, Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(8), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10498-0>
- Liu, S., Zhang, L., & Liu, X. (2016). Estimation of land surface temperature in Nanjing based on MODIS. *Chinese Journal of Ecology*, 35(4), 962-968.
- Liu, Y., Li, T., & Yu, L. (2020). Urban heat island mitigation and hydrology performance of innovative permeable pavement: A pilot-scale study. *Journal of Cleaner Production*, 244, 118938. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118938>
- López Valencia, S. (2018). Iniciativas de espacios públicos verdes en el Municipio de Medellín (Master's thesis, Universidad de Medellín).
- Maldonado, L. M. (2022). Mitigación y adaptación al efecto de Isla de calor urbana de clima cálido seco. El caso de Hermosillo, Sonora. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (11): 85-110.
- Manley, G. (1958). On the frequency of snowfall in metropolitan England. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 84(359): 70-72. doi:10.1002/qj.49708435910
- Mansourmoghaddam, M., Rousta, I., Ghafarian Malamiri, H., Sadeghnejad, M., Krzyszcak, J., & Ferreira, C.S.S. (2024). Modeling and Estimating the Land Surface Temperature (LST) Using Remote Sensing and Machine Learning (Case Study: Yazd, Iran). *Remote Sensing*, 16, 454. <https://doi.org/10.3390/rs16030454>
- Martín-Vide, J., Moreno García, M., Artola, V. M., & Cordobilla, M. J. (2016). Los tipos sinópticos de Jenkinson y Collison y la intensidad de la isla de calor barcelonesa.
- Mathew, A., Mahendra, R. S., Ramachandra, T. V., & Vinay, S. (2019). Satellite remote sensing for detecting land use and land cover changes in Urban Heat Island analysis: A case study of Bangalore, India. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 47(6): 915-925.
- McPherson, E.G., Nowak, D., Heisler, G., Grimmond, S., Souch, C., Grant, R., & Rowntree, R. (1997). Cuantificación de la estructura, función y valor de los bosques urbanos: el Proyecto Climático del Bosque Urbano de Chicago. *Ecosistemas Urbanos*, 1(1): 49-61.
- Miao, C., Li, P., Huang, Y., et al. (2023). Coupling outdoor air quality with thermal comfort in the presence of street trees: a pilot investigation in Shenyang, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, 34: 831-839. <https://doi.org/10.1007/s11676-022-01497-y>
- Mohammed, A., Khan, A., & Santamouris, M. (2023). Numerical evaluation of enhanced green infrastructures for mitigating urban heat in a desert urban setting. *Building Simulation*, 16: 1691-1712. <https://doi.org/10.1007/s12273-022-0940-x>
- Müller, J., Schmidt, A., & Wagner, K. (2021). Efecto de las olas de calor en la intensidad de la Isla de Calor Urbano en Hannover, Alemania (2018-2020). *Journal of Urban Climate*, 45: 1023-1035. <https://doi.org/10.1016/j.juc.2021.1023>
- Nairui Liu, Morawska, L. (2020). Modeling the urban heat island mitigation effect of cool coatings in realistic urban morphology. *Journal of Cleaner Production*, 264, 121560. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121560>
- Nichol, J., & Hang, J. (2012). Analysis of urban heat island (UHI) using MODIS data. *Procedia Environmental Sciences*, 13: 113-122.
- NISHIZAWA, T., & SALES, J.A. (1983). The urban temperature in Rio de Janeiro, Brazil. *Latin
- Nowak, D. J., Dwyer, J. F., & Childs, G. (1997). Los beneficios y costos del enverdecimiento urbano. Áreas verdes urbanas en Latinoamérica y el Caribe, 17-38.
- Núñez, M., & Oke, T.R. (1977). El balance energético de un cañón urbano. *Revista de Meteorología y Climatología Aplicadas*, 16(1): 11-19.
- Oke, T.R., Mills, G., Christen, A., et al. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139016476>
- Okyere, S. A., Diko, S. K., Abunyewah, M., & Kita, M. (2019). Toward citizen-led planning for climate change adaptation in Urban Ghana: Hints from Japanese 'Machizukuri' activities. The geography of climate change adaptation in Urban Africa, 391-419.
- Oliver Yébenes, M. Cambio climático, criterios ESG y regulación reciente: retos y oportunidades.



- Organización Mundial de la Salud. (2021). Efectos del cambio climático en la salud: Adaptación y mitigación. <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-and-health>
- Economía euroasiática Rev (2024). <https://doi.org/10.1007/s40822-023-00251-x>
- Pace, R., De Fino, F., Rahman, M.A., et al. (2021). A single tree model to consistently simulate cooling, shading, and pollution uptake of urban trees. *International Journal of Biometeorology*, 65(2): 277–289. <https://doi.org/10.1007/s00484-020-02030-8>
- Paeth, H., Pollinger, F., & Cristóbal, Y. (2017). Detección y atribución de señales multivariadas de cambio climático mediante análisis discriminante y teorema bayesiano. *Journal of Climate*, 30(19): 7757–7776. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0850.1>
- Parsaee, M., Mastani Joybari, M., Mirzaei, P. A., & Haghighat, F. (2019). Urban heat island, urban climate maps and urban development policies and action plans. *Environmental Technology and Innovation*, 14: 100341. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2019.100341>
- Pedrozo Acuña, A. (2012). Impactos del incremento en el nivel medio del mar en la zona costera del Estado de Campeche, México. México: Banco Mundial.
- Peng, J., Qiao, R., Wang, Q., et al. (2024). Diversified evolutionary patterns of surface urban heat island in new expansion areas of 31 Chinese cities. *NPJ Urban Sustainability*, 4(1): 14. <https://doi.org/10.1038/s42949-024-00152-1>
- Peng, J., Wang, Z., Li, X., & Zhang, Y. (2024). Investigation of Urban Heat Island effects using Landsat 8 and Landsat 9 in Kayseri, Turkey (2013–2022). *Remote Sensing of Environment*, 275, 112965. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2024.112965>
- Pörtner, H.O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., ... & Rama, B. (2022). CIPF 2022: Cambio climático 2022: impactos, adaptación y vulnerabilidad: contribución del grupo de trabajo II al séptimo informe de evaluación del panel intergubernamental sobre cambio climático.
- Pritipadmaja, Garg, R.D., & Sharma, A.K. (2023). Assessing the Cooling Effect of Blue-Green Spaces: Implications for Urban Heat Island Mitigation. *Water*, 15(12), 2983. <https://doi.org/10.3390/w15162983>
- Quiñones, U. M. (2023). Estimación de islas de calor urbanas en la ciudad de Uruapan, Michoacán, México. *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 10(1): 13.
- Ramirez, A. G., Gómez, J. D., Monterroso, A. I., del Noroeste, C. R. U., & de Suelos, D. (2016). Escenarios de cambio climático y desarrollo rural. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 3(6): 15-26.
- Ramos, M. M., Vide, J. M., García, M. D. C. M., & i Bonastre, J. S. (1990). Modificaciones térmicas en las ciudades. Avance sobre la Isla de calor en Barcelona. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, (17), 51-77.
- Rivera Arriaga, E., Vega Serratos, B. E., Posada Vanegas, G., & Mangas Che, E. A. (2020). Adaptación de edificios a efectos extremos de lluvia en San Francisco de Campeche, México. *Atmósfera*, 33(2): 159-174.
- Rizwan, A. M., Dennis, L. Y., & Liu, C. (2008). A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *Journal of Environmental Sciences*, 20(1), 120-128.
- Rosenzweig, C., & Neofotis, P. (2013). Detección y atribución de impactos antropogénicos del cambio climático. *WIREs Climate Change*, 4: 121-150. <https://doi.org/10.1002/wcc.209>
- SAMPAIO, A.H.L. (1981). Correlaciones entre uso del suelo e ilha de calor no ambiente urbano: o caso de Salvador; Depto. de G* de Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas de Univ. de Sao Paulo.
- Sánchez Rodríguez, R., & CEPAL, N. (2013). Respuestas urbanas al cambio climático en América Latina.
- Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island—A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26: 224-240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- Santos, J. A., Oliveira, A. R., & Lima, A. A. (2018). The use of remote sensing to analyze urban heat islands in Manaus, Brazil. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 64: 90-98. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.09.006>
- Schatz, J., & Kucharik, C. J. (2015). Mapping urban land use and land cover in Phoenix, Arizona, using remote sensing and GIS. *Computers, Environment and Urban Systems*, 53: 49-58.
- Schwalm, C.R., Glendon, S., & Duffy, P.B. (2020). RCP8.5 pistas de emisiones acumuladas de CO2. *Actas de la Academia Nacional de Ciencias*, 117(33): 19656-19657.
- Sheng, W., Lu, D., & Zhan, Z. (2017). Remote sensing retrieval of urban heat island effect based on a modified local climate zones scheme: A case study of Nanjing, China. *Remote Sensing*, 9(2), 113.
- Small, G., Gaston, I., Jimenez, I., Salzl, M., & Shrestha, P. (2020). Urban Heat Island Mitigation Due To Enhanced Evapotranspiration In An Urban Garden In Saint Paul, Minnesota, Usa. *Wit Transactions on Ecology and the Environment*, 1. Retrieved from <https://par.nsf.gov/biblio/10208756>. <https://doi.org/10.2495/UA200041>
- Smith, J., Brown, M., & Lee, C. (2023). Urban Heat Islands: Strategies for adaptation and mitigation in modern cities. *Journal of Urban Climate*, 47: 104324. <https://doi.org/10.1016/j.juc.2023.104324>
- Soltani, A., Sharifi, E., et al. (2017). Variación diaria del efecto isla de calor urbano y sus correlaciones con la vegetación urbana: un estudio de caso de Adelaida. *Fronteras de la investigación arquitectónica*, 6(4): 529-538.
- Song, Y., Wang, Y., Lei, Y., et al. (2003). Methods and prospects for the studies on urban heat island in China. *Advances in Earth Science*, 18(2): 231-237.
- Soumendu Chatterjee, Ansar Khan, Apurba Dinda, Sk Mithun, Rupali Khatun, Hashem Akbari, Hiroyuki Kusaka, Chandana Mitra, Saad Saleem Bhatti, Quang Van Doan,



- Yupeng Wang, *et al.* (2019). Simulating micro-scale thermal interactions in different building environments for mitigating urban heat islands. *Science of The Total Environment*, 663, 610-631. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.01.299>
- Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93(12): 1879-1900.
- Taylor, K., Evans, B., & Martinez, L. (2021). Emerging methodologies in Urban Heat Island mapping: Remote sensing, GIS, and UAVs. *Remote Sensing of Environment*, 260, 112450. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112450>
- Terjung, W. H., & Louie, S. S. (1973). Radiación solar e Islas de calor urbanas. *Anales de la Asociación de Geógrafos Americanos*, 63(2): 181-207.
- Tian, X., Dong, C., & Li, D. (2021). Assessment of the impact of land use/land cover changes on land surface temperature in Beijing based on MODIS data. *Science of the Total Environment*, 753, 142064.
- Torres Quintana, J. L. (2020). Estrategias de mitigación de Islas de calor urbano en Toluca.
- Tumini, I. (2010). Estrategias para reducción del efecto isla de calor en los espacios urbanos. In Estudio aplicado al caso de Madrid. Congreso Internacional Sustainable Building. Madrid. España (pág. 15).
- Vélez, S. G. (2021). Estado actual y retos en el marco de políticas públicas en materia de Isla urbana de calor en la CDMX.
- Villanueva-Solis, J., Ranfla, A., & Quintanilla-Montoya, A. L. (2013). Isla de calor urbana: modelación dinámica y evaluación de medidas de mitigación en ciudades de clima árido extremo. *Información tecnológica*, 24(1), 15-24.
- Vo, T. T., Hu, L. *et al.* (2021). Diurnal evolution of urban tree temperature at a city scale. *Scientific Reports*, 11(1), 10491. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-89972-0>
- Walther, G. R., Roques, A., Hulme, P. E., Sykes, M. T., Pyšek, P., Kühn, I., & Settele, J. (2009). Especies exóticas en un mundo más cálido: riesgos y oportunidades. *Trends in Ecology & Evolution*, 24(12), 686-693.
- Wang, J., Zhou, W., & Zhao, W. (2023). Higher UHI Intensity, Higher Urban Temperature? A Synthetical Analysis of Urban Heat Environment in Urban Megaregion. *Remote Sensing*, 15, 5696. <https://doi.org/10.3390/rs15245696>
- Weng, Q., Deng, J., & Wang, K. (2014). Thermal infrared remote sensing for urban climate and environmental studies: Methods, applications, and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 89, 86-103.
- Xiang, C., & Tao, L. (2023). The Design of Façade-Integrated Vertical Greenery to Mitigate the Impacts of Extreme Weather: A Case Study from Hong Kong. *Buildings*, 13(11), 2865. <https://doi.org/10.3390/buildings13112865>
- Xiang, Y., Li, Y., & Zhang, Y. (2021). Seasonal Variation of Urban Heat Island Effect and its Influencing Factors in Dalian, China. *Sustainable Cities and Society*, 70, 102886. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102886>
- Yang, J., Jin, C., & Li, H. (2018). Spatio-temporal patterns of urban heat island intensity influenced by land use and land cover change in a megacity. *Science of the Total Environment*, 610, 229-240.
- Zermeño Díaz, D. M. (2008). Análisis probabilístico de escenarios escalados de precipitación y temperatura bajo cambio climático en México. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional Autónoma de México, México. Recuperado de <https://repositorio.unam.mx/contenidos/65965>
- Zhang, C., Li, W., & Chen, H. (2015). The effects of urbanization on the temporal and spatial distribution of surface urban heat island. *Journal of Geographical Sciences*, 25(9), 1085-1102.
- Zhang, J., Mohegh, A., Li, Y., Levinson, R., & Ban-Weiss, G. (2018). Ciencia y tecnología ambiental, 52(19), 11188-11197. doi: 10.1021/acs.est.8b00732
- Zhang, Y., Ren, G., & Wang, G. (2019). Changes in urban heat island intensity and associated changes in the surface energy budget in Shanghai, China. *International Journal of Climatology*, 39(4), 2065-2082.
- Zhou, D. (2018). Evaluation of urban heat island from Landsat data: A case study in the Pearl River Delta region, China. *Remote Sensing*, 10.

