

Revista Ciencias del Mar UAS



Enero - Marzo 2025

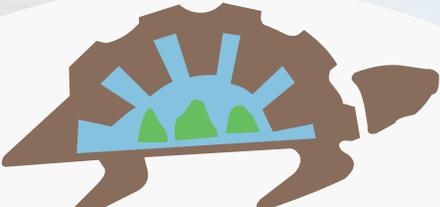
Núm. 2 Vol.2

U N I V E R S I D A D A U T Ó N O M A D E S I N A L O A



**Edición
especial
mujeres
en las ciencias
del mar**

ISSN (en trámite)



CIMMAR

Revista

DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR

Número 2, Volumen 2, ISSN (en trámite)



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA



DIRECTORIO INSTITUCIONAL

- Dr. Jesús Madueña Molina
Rector
- Dr. Jorge Milán Carrillo
Secretario Académico Universitario
- Dr. Manuel Iván Tostado Ramírez
Vicerrector de la Unidad Regional Sur
- Dr. Mario Nieves Soto
Director General de Investigación y Posgrado
- Dr. Joel Cuadras Urias
Director General del Sistema Bibliotecario
- Dr. José Adán Félix Ortiz
Director Facultad de Ciencias del Mar
- Lic. Nidia Odette Santana Rodelo
Coordinadora de Revistas Académicas Universitarias-UAS

Comité Editorial

Dr. Martín Gabriel Frías Espericueta
Editor en jefe

Dr. Eugenio Alberto Aragón Noriega
Editor asociado

L.I. Nerika Azucena Benitez Pardo
Gestora de la Plataforma Editorial

Dr. David Arturo Delgado Esquivel
Corrector de Estilo

T.D.G. Ernesto Alfonso Chávez Aranguré
Diseño gráfico y maquetación

Editores por línea de investigación

Dr. Wenceslao Valenzuela Quiñones, Instituto Politécnico Nacional, México.
Desarrollo de sistemas para la producción sustentable de organismos acuáticos

Dr. Enrique Morales Bojórquez, Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C. México.
Aprovechamiento sustentable de recursos pesqueros

Dra. Ofelia Escobar Sánchez, SECIHTI- Ciudad de México, México.
Manejo sustentable de ambientes costeros

Comité Científico

Dr. Just Tomas Bayle Sempere
Universidad de Alicante, España

Dr. Diego Lercari Bernier
Universidad de la República, Uruguay

Dr. Álvaro Javier Burgos Arcos
Universidad de Nariño, Colombia

Dr. Rodolfo Vögler
Universidad de la República, Uruguay

Dr. Hugo Arancibia Farías
Universidad de Concepción, Chile

Dr. Andrés Cisneros Montemayor
Simon Fraser University, EUA

Dr. Francisco Arreguín Sánchez
Instituto Politécnico Nacional (CICIMAR), México

El Consejo Editorial de CIMAR UAS Revista Científica agradece las generosas colaboraciones realizadas por investigadores nacionales e internacionales pertenecientes a reconocidas universidades y centros de investigación que participaron como pares evaluadores.

ISSN (en trámite)

CINTILLO LEGAL

Revista Ciencias del Mar UAS, es una publicación trimestral editada por la universidad Autónoma de Sinaloa, a través de la Facultad de Ciencias del Mar, con el domicilio en Paseo Claussen S/N, Centro, 82000, Mazatlán, Sinaloa, México. Teléfono (669) 9828656. Editor responsable, Martín Gabriel Frías Espericueta. Reservas de Derechos al Uso Exclusivo Núm. 04-2024-110712440500-102, ISSN: (en trámite).

Cada artículo es obra original del autor, donde son reflejadas sus ideas y apreciaciones; el Comité Editorial y la Revista "Ciencias del Mar UAS" no se hacen participantes de dicha postura, por lo consiguiente el autor de cada artículo/texto será considerado legalmente responsable. La revista Ciencias del Mar UAS rechaza cualquier reclamación legal proveniente por la reproducción parcial o total de la información, y de plagio en los trabajos publicados.

Queda estrictamente prohibida la reproducción total o parcial de los contenidos e imágenes de la publicación sin previa autorización del Instituto Nacional del Derecho de Autor.

latindex



Cada manuscrito está bajo la licencia Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es>.



CONTENIDO

EDITORIAL

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Mujeres que Inspiran: Ciencia, Conservación y Cambio
Inspirational women: Science, Conservation, and Transformation

9-20

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Efecto de dietas suplementadas con pulpa de ciruela del monte (*Cyrtocarpa edulis*) en juveniles de jurel *Seriola rivoliana* sobre el crecimiento, sistema inmune y protección contra *Aeromonas veronii*

Effect of diets supplemented with Mountain plum (*Cyrtocarpa edulis*) pulp in juvenile Almaco Jack *Seriola rivoliana* on growth, immune system and protection against *Aeromonas veronii*

21-40

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Variabilidad en la temperatura de la actividad hidrotermal submarina en la Bahía de Banderas: Análisis a corto plazo

Temperature variability of submarine hydrothermal activity in Banderas Bay: Short-term analysis

41-61

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Estudio de las gónadas del pez pajarito *Hyporhamphus naos* (Hemirhamphidae) parasitadas con *Philometra* sp. (Nematoda: Philometridae) en Mazatlán, Sinaloa
Study of the gonads of the Pacific silverstripe halfbeak (*Hyporhamphus naos*) on the coast of Mazatlán, Sinaloa

62-75

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Huracán Wilma (2005): Análisis del impacto oceanográfico
Hurricane Wilma (2005): Analysis of the Oceanographic Impact

76-95

ARTÍCULO CIENTÍFICO

Arrecifes coralinos en Mahahual: estado de conservación actual e importancia de una gestión local.

Mahahual coral reefs: current conservation status and the relevance of local management.

96-125

REVISIÓN CIENTÍFICA

Riesgo a la salud humana por el contenido de níquel en pescados y mariscos
Risk to human health due to nickel content in fish and shellfish

126-135

NOTA CIENTÍFICA

***Metamysidopsis frankfiarsi* (Crustacea: Mysidae) hospedero intermediario de *Rhadinorhynchus trachinoti* (Acanthocephala: Rhadinorhynchidae) en la costa de Mazatlán, Sinaloa**

Metamysidopsis frankfiarsi (Crustacea: Mysidae) is the intermediate host of *Rhadinorhynchus trachinoti* (Acanthocephala: Rhadinorhynchidae) on the coast of Mazatlán, Sinaloa

136-143

NOTA CIENTÍFICA

Polyandry in *Gymnura marmorata* from the Upper Gulf of California
Poliandria en *Gymnura marmorata* del Alto Golfo de California

144-158

REVISIÓN CIENTÍFICA

Una breve revisión sobre los microplásticos en los ecosistemas acuáticos
A brief review on microplastics in aquatic ecosystems

159-185



Carta a mis estimadas colegas, investigadoras y aliadas en el camino de la ciencia:

Es para mí un honor haber sido invitada como Editora asociada a esta edición especial “*Mujeres en las Ciencias del Mar*”, de la Revista *Ciencias del Mar* UAS, editada por la Facultad de Ciencias del Mar de la UAS, mi alma mater.

Aquí estudié la carrera de Biología Pesquera, en una época en la que claramente predominaban los hombres, con apenas un 10% de mujeres inscritas, algunas de las cuales veníamos de otras partes del país para formarnos en este campo de la ciencia. Siguiendo los cambios del país, la FACIMAR también ha evolucionado y se ha diversificado y veo con mucha alegría que se haya incrementado notablemente el número de mujeres que eligen estudiar alguna de las carreras que hoy oferta, en diferentes áreas de biología pesquera, biología acuícola o gestión de zona costera.

Por ello celebro que la revista Ciencia del Mar UAS, que me acompañó desde mi época de estudiante, y que actualmente busca posicionarse entre las mejores revistas de su género a nivel nacional e internacional, ofrezca en esta edición única, visibilizar y destacar la participación de las mujeres en la generación de conocimiento para las diversas áreas de las ciencias del mar. El estudio del mar ha sido históricamente un campo con brechas de género; sin embargo, la participación y consolidación de investigadoras en ciencias marinas está creciendo.

En cada uno de los artículos seleccionados para este número, se aprecia una sólida formación académica y se refleja el compromiso de las autoras sobre el cuidado y preservación del medio ambiente, el aprovechamiento sustentable de los océanos y el interés por impactar la producción de alimento mediante la acuicultura, utilizando diversas técnicas y herramientas que pasan desde el conocimiento tradicional hasta el uso de modernas técnicas moleculares y de informática. Sabemos que cada estudio, cada inmersión, cada expedición y cada logro alcanzado, refleja no solo el talento individual, sino también la fuerza colectiva de una comunidad de mujeres que se apoya, se enriquece y se impulsa mutuamente. Constatar que a través de nuestras investigaciones se



avanza para lograr una sociedad más equitativa al cumplir con los objetivos de desarrollo sostenible, es altamente satisfactorio y gratificante. Ha sido un gran desafío para las mujeres llegar a destacar en el ámbito laboral, en lo social y en lo académico. Por ello, debe resaltarse el desempeño que hemos tenido en lo académico, el impacto logrado en la producción de artículos científicos, capítulos y libros de divulgación, el liderazgo en la conducción de proyectos de investigación, innovación y desarrollo, así como nuestra participación en la formación y capacitación de recursos humanos de todos los niveles. Hoy, ese liderazgo es evidente cuando la dirección de Universidades y Centros de Investigación del país está en manos de mujeres.

Estamos viviendo una época de empoderamiento femenino denominada “*tiempo de mujeres*”, el ascenso de la primera mujer Presidenta y una mujer a cargo de la primera Secretaría de estado dedicada al quehacer científico, además de mujeres en puestos parlamentarios y ocupando cargos ejecutivos del más alto nivel.

En particular, en poco más de 30 años de trabajo profesional he tenido episodios difíciles de sortear como científica, madre y esposa, sin embargo, el apoyo que me han dado otras y otros colegas, me ha ayudado a comprobar que para las mujeres perseverantes no hay más límites que los que se autoimponen. Me congratula profundamente ser parte de este grupo de mujeres que inspiran a otras en la generación de conocimiento y en la promoción de las futuras generaciones de mujeres y niñas científicas en temas como la pesca, acuicultura, ambiente y desarrollo sustentable. Sigamos trabajando juntas, motivadas por la pasión por conocer y preservar nuestro planeta azul.

Con mi más sincera admiración para todas y todos los que han hecho posible la existencia de la Revista Ciencias del Mar UAS en todas sus ediciones y con gratitud para quienes me hicieron participe de este evento, me despido

Dra. Crisantema Hernández González

Investigadora Titular

Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo A. C.



Revista CIMAR UAS

REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR ISSN (en trámite)



 Artículo Científico

Mujeres que Inspiran: Ciencia, Conservación y Cambio

Inspirational women: Science, Conservation, and Transformation



 1. Rosa Stephanie Navarro-Peraza

 0000-0001-6835-4743

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa. Paseo Claussen S/N, Colonia Los Pinos, 82000, Mazatlán, Sinaloa, México. Autor de correspondencia: rosa.navarro@uas.edu.mx

 1. Diana Judith López-Peraza

 0000-0002-7344-4134

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa. Paseo Claussen S/N, Colonia Los Pinos, 82000, Mazatlán, Sinaloa, México.

latindex



CREATIVE COMMONS

 OPEN ACCESS

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el origina



Mujeres que Inspiran: Ciencia, Conservación y Cambio

Inspirational women: Science, Conservation, and Transformation

► ABSTRACT

Women's involvement in both social and scientific domains is crucial for driving progress towards a more equitable and sustainable society, particularly in areas like environmental conservation and scientific outreach. This study, using qualitative interviews, examined the experiences and challenges faced by three female leaders in conservation and scientific communication within communities in Mexico. The participants included representatives from local initiatives: a leader from a Sea Turtle Sanctuary (Santuario Tortuguero Playa Ceuta), a leader from a Nonprofit Organization (Mujeres en la Ciencia de la Laguna A.C.), and a member of a group of women involved in scientific and community diving (Sirenas de Natividad). The study explored the sociocultural factors influencing their professional paths, along with the strategies they have employed to navigate gender-related challenges. The findings highlight the significance of female empowerment and community support networks in advancing gender equality in scientific and conservation activities. This research offers valuable insights into the obstacles and accomplishments of women in traditionally less accessible fields, underscoring their contributions to sustainable development and natural resource management.

Keywords: scientific outreach, environmental conservation, women's leadership



► RESUMEN

La participación de la mujer en los ámbitos social y científico es fundamental para el avance hacia una sociedad más equitativa y sostenible, especialmente en sectores como la conservación ambiental y la divulgación científica. Este estudio exploró mediante entrevistas con enfoque cualitativo, las experiencias y desafíos de tres mujeres líderes en la conservación y divulgación científica en comunidades de México. Las participantes son representantes de iniciativas locales: una líder de un santuario tortuguero (Santuario Tortuguero Playa Ceuta), la fundadora de una asociación civil (Mujeres en la Ciencia de la Laguna A.C.), y una representante de un grupo de mujeres dedicadas al buceo científico y comunitario (Sirenas de Natividad). Por medio de entrevistas, se analizaron los factores socioculturales que han moldeado sus trayectorias profesionales, así como las estrategias empleadas para superar barreras de género, principalmente. Los hallazgos subrayan la importancia del empoderamiento femenino y las redes de apoyo comunitarias en la promoción de la equidad de género en actividades científicas y de conservación ambiental. Este trabajo aporta perspectivas sobre los retos y logros de las mujeres en campos históricamente menos accesibles para ellas, destacando su contribución al desarrollo sostenible y la gestión de recursos naturales.

Palabras clave: Divulgación científica, conservación ambiental, empoderamiento femenino

► INTRODUCCIÓN

La participación de las mujeres en la ciencia y la conservación ha sido esencial para el desarrollo de soluciones innovadoras ante los desafíos ambientales actuales. A pesar de su contribución significativa, las mujeres a menudo enfrentan barreras profesionales y sociales que limitan su representación y liderazgo en estos campos.

En este contexto, las Naciones Unidas (2015) reconocen, en la Agenda 2030, la necesidad de garantizar la inclusión equitativa de las mujeres en el cuidado y la protección del medio ambiente. El Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) número 5, titulado Igualdad de Género, enfatiza la



importancia de promover la igualdad de oportunidades en todos los ámbitos y empoderar a las mujeres y niñas para que puedan participar activamente en la toma de decisiones y en acciones concretas para el desarrollo sostenible.

Diversos estudios han señalado que las mujeres tienden a considerar factores o situaciones que pudieran presentarse tanto a corto como a largo plazo, como el cambio climático, el agotamiento de los recursos naturales y el deterioro económico, lo que las lleva a orientar sus acciones hacia la búsqueda de alternativas de manejo sustentable. En cambio, los hombres suelen priorizar la obtención de beneficios constantes, aunque estos sean limitados y conllevan riesgos (Arroyo-Mina et al., 2016).

Un ejemplo destacado de la participación femenina en la conservación es el trabajo de las mujeres en las Áreas Naturales Protegidas (ANP). En México, la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) promueve activamente la participación equitativa de las mujeres en proyectos relacionados con la gestión y conservación de estos espacios. A través de su liderazgo en programas de restauración, vigilancia y educación ambiental, las mujeres no solo contribuyen a fortalecer las capacidades locales sino que también ayudan a impulsar una gestión más inclusiva y efectiva de los recursos naturales (CONANP, 2022).

No obstante, aunque se han logrado avances importantes en materia de igualdad de género, muchas de las acciones implementadas en el marco de la sustentabilidad han sido de carácter técnico y, en su mayoría, han estado dirigidas a la población masculina. En este sentido, el aumento de la participación de las mujeres mexicanas en la ciencia y la investigación debe impulsar la creación de programas que favorezcan su desarrollo, adoptando un enfoque de colaboración y empatía con sus necesidades específicas (Mendieta-Ramírez, 2015).

El objetivo de este trabajo fue analizar, a través de entrevistas cualitativas, las experiencias, desafíos y contribuciones de mujeres involucradas en diversas iniciativas de conservación ambiental y participación científica en México. Se buscó destacar su influencia en la formulación e implementación de estrategias de preservación y sostenibilidad, además de examinar cómo las dinámicas de género impactan su desempeño y cómo estas mujeres enfrentan y superan las barreras sociales, culturales y profesionales en su campo de acción.



► MATERIALES Y MÉTODOS

Se emplearon tres cuestionarios con preguntas abiertas y un enfoque semiestructurado para recopilar información sobre las experiencias, desafíos y contribuciones de mujeres involucradas en diversas iniciativas de conservación ambiental y participación científica en México. Las participantes incluyeron a la fundadora de la asociación civil Mujeres en la Ciencia de la Laguna A.C. ubicada en Gómez Palacio, Durango, a la líder del santuario tortuguero Playa Ceuta ubicado en Celestino Gazca Villaseñor, Elota, Sinaloa y a una representante de Sirenas de Natividad, un colectivo de mujeres de Isla Natividad, en el municipio de Mulegé, Baja California Sur, que combina el buceo científico con prácticas comunitarias para la conservación marina. Las participantes seleccionadas para estas entrevistas son referentes fundamentales en la promoción de la equidad de género en el ámbito científico y de conservación. Cada una de ellas ha desarrollado iniciativas que han transformado la manera en la que se percibe y se aborda la inclusión de las mujeres en la ciencia, desde la educación hasta la toma de decisiones a nivel institucional. Se puso especial énfasis en los factores que han influido en sus trayectorias profesionales y en las estrategias que han implementado para superar los obstáculos.

Las entrevistas se realizaron de manera virtual, utilizando videoconferencias o por escrito, dependiendo de la disponibilidad de las participantes, y tuvieron una duración promedio de 60 minutos. Todas las entrevistas se llevaron a cabo con el consentimiento informado de las participantes y fueron transcritas para su análisis.

► RESULTADOS

A partir de las entrevistas semiestructuradas, se identificaron patrones clave que reflejan los desafíos más comunes que enfrentan estas mujeres en su trayectoria profesional, incluyendo la falta de reconocimiento y la persistencia de estereotipos de género. Sin embargo, también se destacaron las estrategias utilizadas para superar estas barreras, tales como la construcción de redes de apoyo, la búsqueda de capacitación



continua y la integración de iniciativas comunitarias.

Además, las narrativas presentadas a continuación destacan el impacto positivo de su labor, no solo en la conservación ambiental, sino también como una fuente de inspiración para otras mujeres dentro de sus comunidades.

Mujeres en la Ciencia de la Laguna A.C. (Gómez Palacio, Durango)

Mujeres en la Ciencia de la Laguna A.C. es una asociación civil enfocada en promover la ciencia y la tecnología con perspectiva de género. Fue fundada por la Dra. Ilse Estefanía Segura Zarzosa, especialista en ciencias en manejo de la vida silvestre y desarrollo sustentable por la Universidad Autónoma de Nuevo León.

Asimismo, esta asociación es un espacio participativo dedicado a empoderar a mujeres y niñas en las áreas STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas, por sus siglas en inglés). La asociación, fundada en 2022 por seis colaboradoras, cuenta actualmente con 20 integrantes. La Dra. Segura-Zarzosa explicó que este proyecto sin fines de lucro promueve la equidad de género desde una perspectiva multidisciplinaria, ya que sus colaboradoras son especialistas en áreas como las ciencias biológicas e ingeniería, entre otras. El principal objetivo es crear redes de colaboración basadas en el perfil profesional de cada mujer involucrada.

Asimismo, esta asociación colabora actualmente en el plan de manejo de la reciente Área Natural Protegida Ríos y Montañas de la Comarca Lagunera, enfocándose en la inclusión de la equidad de género como eje central. El objetivo es integrar la perspectiva de género de manera transversal en todas las actividades del proyecto, reconociendo los diversos roles que desempeñan las mujeres e incorporándolas de forma integral en cada proceso.

Santuario tortuguero Playa Ceuta (Celestino Gazca Villaseñor, Elota, Sinaloa)

El Santuario Playa Ceuta es un ANP (CONANP, 2024) ubicada en Celestino Gazca Villaseñor, en el municipio de Elota, en la región centro-sur de Sinaloa y cuenta con la certificación de sitio RAMSAR



(Número 1824) (Secretaría de la Convención RAMSAR, 2024). Esta ANP abarca aproximadamente 55 km, divididos en tres secciones: Playa Norte, Centro y Sur. En Celestino Gazca Villaseñor, la zona central que comprende alrededor de 20 km es la que se gestiona y protege. El santuario se dedica al monitoreo, protección, conservación y repoblación de diversas especies de tortugas marinas, entre las que se encuentran la tortuga golfina (*Lepidochelys olivacea*), la tortuga laúd (*Dermochelys coriacea*) y la tortuga prieta (*Chelonia agassizii*), todas clasificadas en peligro de extinción y sujetas a veda, según la Norma Oficial Mexicana (NOM) 059 (SEMARNAT, 2010). Además, en el santuario se lleva a cabo el monitoreo de aves como el charrán mínimo (*Sternula antillarum*), el chorlito nevado (*Charadrius nivosus*), el ostrero americano (*Haematopus palliatus*) y el gallito marino (*Sternula antillarum*), junto con actividades de educación ambiental y recolección de residuos.

Fundado en 2005, el Santuario Playa Ceuta cuenta con Erika Marlene Gutiérrez Cristerna como presidenta del Consejo Asesor. Marlene tiene más de 20 años de experiencia como monitorea comunitaria y aproximadamente 16 años como artesana. Actualmente, en el santuario colaboran 10 personas que trabajan como promotores ambientales y 5 que se desempeñan como monitores ambientales.

La inspiración de Marlene para crear el santuario provino de sus padres, quienes trabajaban en Playa Ceuta, en la sección Norte. La ubicación del santuario, entre los ríos Elota y Piaxtla, presentaba desafíos, ya que cuando uno de los ríos se desbordaba, la comunicación con el resto del área se veía interrumpida, impidiendo la realización de las actividades. A través de la CONANP, Marlene recibió capacitaciones y se involucró cada vez más en el proyecto.

Marlene también mostró un interés particular en crear productos a partir de desechos encontrados en el santuario y la playa. Gracias a la capacitación de la CONANP, aprendió a realizar artesanías y bisutería ecológica con conchas, plumas de aves, semillas, cáscara de coco y otros materiales, iniciativa que ha resultado muy exitosa. Posteriormente, ella misma se ha encargado de capacitar a otras personas interesadas en aprender estas técnicas.



Actualmente, además de las actividades principales, el santuario organiza talleres, fruto de las capacitaciones recibidas por la CONANP, donde se utilizan personajes para enseñar a los niños la importancia de conservar la biodiversidad de los ambientes costeros y marinos, proteger las especies, reciclar y otras prácticas ambientales.

Sirenas de Natividad (Isla Natividad, Mulegé, Baja California Sur)

Sirenas de Natividad es un grupo de mujeres dedicadas al monitoreo biológico y oceanográfico, a través del programa Igualdad de Género en el Mar desarrollado por Comunidad y Biodiversidad A.C. (COBI), que apoya en la implementación de reservas marinas. La primera generación de buzas se formó en 2012 y en 2013 comenzaron a laborar en el monitoreo de los ecosistemas marinos de la región. Originalmente, estas actividades eran principalmente realizadas por hombres, pero desde entonces, las mujeres comenzaron a recibir capacitación y a participar activamente en la conservación marina. Actualmente, el grupo está integrado por Elba López, Esmeralda Albañez, Sulema García, Mitzi Leal y Elsa Cuellar, todas esposas de pescadores. Con el paso de los años, Sirenas de Natividad ha crecido y se ha consolidado como un referente regional, desempeñando un papel crucial en la protección de los ecosistemas marinos y en la visibilidad de las mujeres en la ciencia y la conservación.

Este grupo opera en la Isla Natividad, ubicada en el municipio de Mulegé, Baja California Sur, que forma parte de las 16 islas que integran el Área Natural Protegida Reserva de la Biosfera El Vizcaíno (CONANP, 2019), y que se considera zona núcleo dentro de dicha reserva. Para llevar a cabo sus actividades, las Sirenas de Natividad se han capacitado en buceo, monitoreo e identificación de especies, lo que les ha permitido reconocer más de 50 especies de peces, invertebrados y algas. Además, realizan monitoreos submarinos en sus comunidades, llevan a cabo la implantación y cosecha de perlas de abulón azul (*Halotis fulgens*) y se encargan del mantenimiento y descarga de datos de sensores oceanográficos (López-Galaviz et al., 2015).

En 2019, el nombre "Sirenas de Natividad" fue propuesto por Elba López en el marco de un concurso llamado "Sororidad en el Mar", con el



objetivo de involucrar a más mujeres de la comunidad en la protección del océano. Este proyecto busca ser una fuente de inspiración para otras mujeres de comunidades pesqueras, demostrando que su trabajo en la conservación marina es esencial para el sector pesquero, al cual muchas veces no se sienten vinculadas.

Además de su trabajo en monitoreos biológicos y oceanográficos, que proporcionan datos clave para la toma de decisiones en las pesquerías, las Sirenas de Natividad han iniciado programas de educación ambiental en las escuelas de las comunidades costeras cercanas, con el fin de sensibilizar a las nuevas generaciones sobre la importancia de la conservación del medio ambiente marino.

A pesar de los desafíos iniciales, como la falta de credibilidad en su labor por parte de algunos miembros de la comunidad, las Sirenas de Natividad han logrado generar un impacto positivo, reflejado en la formación de otros grupos de mujeres en la península de Yucatán. Este éxito ha sido reconocido, pues en 2024 obtuvieron el segundo lugar en la categoría de Investigación Pesquera y Acuícola del Premio a la Pesca y Acuicultura Sustentables, otorgado por la Comisión Nacional de Acuicultura y Pesca (CONAPESCA), un reconocimiento que fomenta el trabajo que contribuye al desarrollo sostenible de la pesca y la acuicultura.

► DISCUSIÓN

La igualdad de género y el empoderamiento de las mujeres son objetivos fundamentales reconocidos globalmente en el ámbito de los derechos humanos y esenciales para el desarrollo sostenible (PNUMA, 2020). En este contexto, la participación de las mujeres en la conservación ambiental y la divulgación científica ha demostrado avances significativos, pero también sigue enfrentando importantes desafíos. A pesar de los logros en liderazgo y toma de decisiones en áreas clave como la conservación, las mujeres continúan enfrentando barreras asociadas a la brecha de género, como lo evidencian diversos estudios (Mendieta-Ramírez, 2015; Cárdenas-Tapia, 2015).



Uno de los hallazgos más destacados de este estudio es el papel crucial que juegan las redes de apoyo y el empoderamiento colectivo en la superación de las barreras socioculturales que limitan la participación femenina. Las participantes compartieron experiencias de colaboración y apoyo mutuo dentro de sus comunidades, lo que coincide con lo señalado por Mendoza-Robles y Pacheco-Pazos (2024), quienes argumentan que el empoderamiento de las mujeres no solo depende de la autonomía individual, sino también de un respaldo colectivo y la construcción de redes sólidas.

Sin embargo, a pesar de los avances, las barreras invisibles como la falta de reconocimiento, la exclusión en espacios clave y la discriminación de género siguen siendo desafíos persistentes. Las participantes coincidieron en que, en muchos casos, las mujeres son percibidas más como *colaboradoras* que como líderes en sus respectivos campos, un fenómeno en el que los roles de liderazgo continúan siendo reservados para los hombres. Este patrón de invisibilización de las mujeres ha sido ampliamente documentado, como lo señala Rodríguez-Cabrera (2019), quien concluye que, a pesar de los avances hacia la equidad de género, la exclusión de las mujeres sigue siendo una realidad en muchas disciplinas.

A pesar de estos obstáculos, las mujeres siguen desempeñando un papel fundamental en la conservación y la divulgación científica. No solo aportan sus conocimientos y habilidades, sino que también promueven nuevas perspectivas y enfoques innovadores para abordar los desafíos ambientales globales (PNUMA, 2020). En consecuencia, es crucial seguir impulsando el liderazgo de las mujeres en estos campos, promoviendo un enfoque de género que asegure la igualdad de oportunidades y contribuya a generar cambios globales sostenibles y equitativos.



▶ AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Ilse Segura, Marlene Gutiérrez y Elsa Cuellar, por la valiosa información y apoyo brindado, su colaboración ha sido fundamental para el desarrollo de este trabajo.

▶ LITERATURA CITADA

Arroyo-Mina, J. A., Revollo-Fernández, D. A., Aguilar-Ibarra, A., Georgantzis, N. (2016) Economic behavior of fishers under climate-related uncertainty: Results from field experiments in Mexico and Colombia. *Fisheries Research*, 183, 304–317. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fishres.2016.05.020>

Cárdenas-Tapia, M. (2015). La Participación de las Mujeres Investigadoras en México. *Investigación Administrativa*, 44(116) Recuperado el 25 de octubre de 2024, de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2448-76782015000200004&lng=es&tlng=es.

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2019). Reserva de la Biosfera El Vizcaíno. Recuperado el 28 de diciembre de 2024, de <https://www.gob.mx/conanp/documentos/reserva-de-la-biosfera-el-vizcaino-206925>

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2022). Mujeres libres, mujeres líderes. Recuperado el 30 de diciembre de 2024, de <https://www.gob.mx/conanp/articulos/mujeres-libres-mujeres-lideres?idiom=es>

Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2024). Playa Ceuta. Recuperado el 8 de noviembre de 2024, de <https://descubreanp.conanp.gob.mx/es/conanp/ANP?suri=125>



- López-Galaviz, E., Cuellar Rodríguez, E., Leal Padilla, M., Hernández Velasco, A., Espinoza A., Fulton, S. (2015).** *Buzas de la Isla Natividad: Inspirando la Conservación en la Península de Baja California*. Resúmenes (en extenso) de la 68 conferencia Gulf and Caribbean Fisheries Institute, November 9-13, 2015. Panama City, Panama. pp. 27-29.
- Mendieta-Ramírez, A. 2015** Desarrollo de las Mujeres en la Ciencia y la Investigación en México: un Campo por Cultivar. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 12(1), 107-115.
- Mendoza-Robles, D. L., Pacheco-Pazos, M. H. (2024).** Construcción de redes entre mujeres académicas como estrategia colaborativa. *Revista Espacio I+D Innovación más Desarrollo*, 12(36), 18-25. <http://dx.doi.org/10.31644/IMASD.36.2024.a02>.
- Naciones Unidas. (2015).** *Transformar nuestro mundo: La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*. Recuperado el 12 de septiembre de 2024, de <https://sdgs.un.org/2030agenda>
- Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). (2020).** Género y medio ambiente: un análisis preliminar de brechas y oportunidades en América Latina y el Caribe. Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. Ciudad de Panamá: PNUMA. Recuperado el 28 de diciembre de 2024, de <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/34929>
- Rodríguez-Cabrera, H. M. (2019).** Empowerment of women in Science: Myth or Reality [Carta al Editor]. *Revista Bionatura*, 4(1). <http://dx.doi.org/10.21931/RB/2019.04.01.2>
- Secretaría de la Convención de Ramsar. (2024).** Sistema Lagunar Ceuta. Servicio de Información sobre Sitios Ramsar. Recuperado el 8 de noviembre de 2024, de <https://rsis.ramsar.org/es/ris/1824>
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2010).** Protección ambiental-Especies nativas de México de flora y fauna silvestres-Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio-Lista de especies en riesgo (NOM-059-SEMARNAT-2010). Recuperado el 8 de noviembre de 2024, de <https://www.dof.gob.mx>



Artículo Científico

Efecto de dietas suplementadas con pulpa de ciruela del monte (*Cyrtocarpa edulis*) en juveniles de jurel *Seriola rivoliana* sobre el crecimiento, sistema inmune y protección contra *Aeromonas veronii*

Effect of diets supplemented with Mountain plum (*Cyrtocarpa edulis*) pulp in juvenile Almaco Jack *Seriola rivoliana* on growth, immune system and protection against *Aeromonas veronii*

latindex



CREATIVE COMMONS



Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el origina



1. Martha Reyes-Becerril
Grupo de Inmunología y Vacunología.
Línea de Fitoquímica Aplicada a la Salud Animal (FASA). Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste (CIBNOR), Av. Instituto Politécnico Nacional 195, Playa Palo de Santa Rita Sur, La Paz B.C.S. 23096, México
Autor de correspondencia: mreyes04@cibnor.mx



Efecto de dietas suplementadas con pulpa de ciruela del monte (*Cyrtocarpa edulis*) en juveniles de jurel *Seriola rivoliana* sobre el crecimiento, sistema inmune y protección contra *Aeromonas veronii*

Effect of diets supplemented with Mountain plum (*Cyrtocarpa edulis*) pulp in juvenile Almaco Jack *Seriola rivoliana* on growth, immune system and protection against *Aeromonas veronii*

▶ RESUMEN

Este estudio investiga el efecto de dietas suplementadas con pulpa de ciruela del monte *C. edulis* (*CeF*) (0.5%, 5g/kg de alimento) en juveniles de jureles *Seriola rivoliana* sobre parámetros zootécnicos, inmunitarios en suero, así como salud intestinal a las dos y cuatro semanas, y a la semana cinco después de un reto infeccioso contra la bacteria *Aeromonas veronii*. En general, se observó un incremento significativo en ganancia de peso y crecimiento absoluto después del reto infeccioso en peces alimentados con *CeF* en comparación con el control. Los valores de los parámetros inmunitarios como mieloperoxidasa y óxido nítrico, así como la actividad de las enzimas antioxidantes superóxido dismutasa y catalasa, se incrementaron en suero de peces alimentados con *CeF* en todos los tiempos de muestreo. Finalmente, en el intestino posterior de los peces suplementados con dietas ricas en *CeF* se observó un incremento en las células caliciformes, esto se puede asociar a un incremento en la producción de moco para una mayor protección de las mucosas y una mejor salud intestinal. Los resultados demuestran que la pulpa de ciruela del monte es una alternativa potencial como aditivo inmunoestimulante en peces ayudando a incrementar su resistencia ante infecciones contra *A. veronii*.

Palabras claves: Ciruela del monte, dietas, crecimiento, sistema inmune, jurel.



► ABSTRACT

This study investigates the effect of diets supplemented with *C. edulis* (*CeF*) (0.5%, 5g/kg of feed) in Almaco Jack *Seriola rivoliana* on zootechnical and serum immune parameters, as well as intestinal health at two, four and five weeks after an infectious challenge against the *A. veronii* bacteria. Overall, a significant increase in weight gain and absolute growth was observed after the infectious challenge in fish fed *CeF* compared to the control. Immune parameters such as myeloperoxidase and nitric oxide, as well as the antioxidant enzymes superoxide dismutase and catalase were increased in serum from fish fed *CeF* at all sampling times. Finally, an increase in goblet cells was observed in the anterior intestine of fish supplemented with diets rich in *CeF*, this translates into an increase in mucus production for greater protection of the mucosa and better intestinal health in fish. The results demonstrate that *C. edulis* fruit is an alternative with great potential as an immunostimulant additive in fish, helping to increase their resistance to infections with *A. veronii*.

Keywords: *Cyrtocarpa edulis*, diets, growth parameters, immune system, Almaco Jack

► INTRODUCCIÓN

La acuicultura es uno de los sectores de mayor crecimiento a nivel mundial, por lo que la implementación de nuevos sistemas eco-amigables debe ser propuesta para mitigar efectos dañinos, entre ellos el uso de antibióticos. Las plantas medicinales, además de ser una fuente ecológica son económicas y fáciles de obtener. Recientemente, en acuicultura, se han evaluado por sus efectos antioxidantes, inmunoestimulantes, antimicrobianos y antiinflamatorios. Varios extractos de plantas han sido evaluados por incrementar la resistencia ante infecciones causadas por bacterias en peces (Palanikani, Chanthini, Soranam, Thanigaivel, Karthi, SenthilNathan Murugesan, 2020; Abu-Zahra, ElShenawy, Ali, Al-sokary, Mousa, El-Hady, 2024; Ghada, El-Gammal, Gehan, Ali, Aly, Saif, Shaimaa, Elbaz, Sabreen, E., Fadl, Nagwa, Abu-Zahra, 2025). México es un país rico en plantas



medicinales que han sido usados por los antiguos pobladores para aliviar padecimientos y enfermedades en humanos, sin embargo, su estudio y evaluación en la acuicultura mexicana es reciente. El árbol de ciruelo del monte *Cyrtocarpa edulis* es una especie endémica de México que crece en la región sureste de la península de Baja California (León de la Luz, Pérez Navarro 2007). Este árbol da un fruto comestible en temporada de lluvias (junio-septiembre) conocido como “ciruela del monte” de color amarillo con fruto carnoso y ligero sabor ácido. Este fruto es usado principalmente para la elaboración artesanal de licores y mermeladas. Pocos son los estudios sobre sus efectos biológicos, entre ellos, se ha evaluado su efecto antimicrobiano utilizando extractos de hojas (Encarnación-Dimayuga, Virgen, Ochoa, 1998) de las cinco especies de *Cyrtocarpa*. La más estudiada por sus propiedades medicinales es *C. procera* Kunth, la cual mostró actividad contra la bacteria *Helicobacter pylori* (Escobedo-Hinojosa et al. 2012). Recientemente, nuestro grupo de investigación se ha enfocado en el estudio de este fruto (pulpa y cáscara) y la evaluación de su efecto inmunoestimulante y antimicrobiano en acuicultura de peces de agua marina y de agua dulce (Reyes-Becerril, Maldonado-García, López, Calvo-Gómez, Díaz, 2024; Machuca, Angulo, Monreal-Escalante, Méndez-Martínez, Magallón-Servín, Vázquez-Juárez, Silva-Jara, Angulo, 2024; Velázquez-Carriles, Angulo, Macías-Rodríguez, Reyes-Becerril, 2025). Entre las propiedades se encontró que la pulpa de ciruela del monte es rica en carbohidratos y fitoesteroles, además de tener una alta actividad antioxidante. En dietas suplementadas (0.5% de pulpa) para juveniles de jurel se observó un incremento de parámetros inmunológicos en el mucus de piel, así como de la expresión de genes relacionados a citocinas proinflamatorias en el intestino, y de la resistencia de los peces a la infección por *A. veronii*. En Baja California Sur, la acuicultura es una actividad prometedora con alta actividad en el mercado. Entre los peces que se cultivan se encuentra el jurel *Seriola rivoliana*, huachinango del Pacífico *Lutjanus peru* y totoaba *Totoaba macdonaldi*, por lo que sus estudios para conocer su biología (inmunología, nutrición, fisiología, reproducción, etc), son de gran importancia. Por lo tanto, el objetivo de este estudio se enfocó en evaluar el efecto de dietas suplementadas con



pulpa de ciruela del monte sobre crecimiento, sistema inmune en suero y resistencia contra la infección por *A. veronii* en juveniles de jurel *Seriola rivoliana*, un pez de cultivo en la industria de Baja California Sur debido a su excelente calidad en carne y rápido crecimiento, factores relevantes para el mercado internacional (Serrano-Pinto, Bernay, Moreno-Legorreta, Ortega-Rubio, Maldonado-García, 2020).

▶ MATERIALES Y MÉTODOS

Ciruela del monte y dietas

Fruto de ciruela del monte fue recolectada en el mes de agosto (verano) en la localidad Ampliación Centenario, ubicada al norte de la ciudad de La Paz, B.C.S., México. La fruta fue lavada con agua destilada estéril para quitar residuos, posteriormente la cáscara y semilla fueron eliminadas para obtener la pulpa. La deshidratación de la pulpa se llevó a cabo por 24 horas en una liofilizadora (Labconco Corporation, Kansas City, MO, U.S.A.). La pulpa liofilizada se guardó en bolsas de plástico protegidas de la luz a 4°C hasta su uso.

Se realizaron dos dietas: una dieta control sin pulpa de ciruela del monte y una dieta con pulpa de ciruela del monte (*CeF*) al 0.5% (5g/kg de dieta). Para la preparación de las dietas (control y *CeF*) se utilizó como base la dieta comercial (Aquatech, Peru), la cual fue pulverizada con la ayuda de un molino y con una batidora se mezcló vigorosamente y se agregó ácido algínico como aglutinante (1.5%; SIGMA, 180947). Para la dieta experimental (*CeF*), la pulpa liofilizada fue agregada lentamente al 0.5% hasta lograr una mezcla homogénea para finalmente agregar el agua (40% del total del peso final, un kilogramo). La mezcla fue pasada por un molino de carne con una criba de 2 mm, los pellets resultantes se colocaron en una estufa a una temperatura de 37 °C por 24 horas. Las dietas fueron guardadas en bolsas de plástico a 4 °C hasta su uso.

Peces y diseño experimental

Este ensayo fue realizado en diciembre de 2022 y se utilizaron 60 peces sanos que fueron colocados en un sistema cerrado de seis tanques (200 L) con agua de mar (Protocolo aprobado: NOM-062-ZOO-1999 y NOM-008-ZOO-1994, Velázquez-Carriles et al., 2025). Cada tratamiento fue analizado en triplicado (10 peces por tanque). Antes del bioensayo, los peces fueron pesados y medidos y la tasa diaria de consumo de alimento fue ajustada al 2% de su peso vivo. Los peces se alimentaron dos veces al día (50% a las 8 am y 50% a las 2:00 pm). Después de la semana dos y cuatro de alimentación, los peces fueron muestreados (n=9). Para el muestreo, los peces fueron anestesiados usando aceite de clavo (100 mg/L) y las muestras de sangre colectadas fueron centrifugadas (10000 *revoluciones por minuto* x 10 min a 4 °C) para obtener el suero. Para los análisis histológicos, un fragmento del intestino posterior (1 cm) fue colectado y colocado en cajas rotuladas en solución Davidson con agua marina para su posterior análisis.

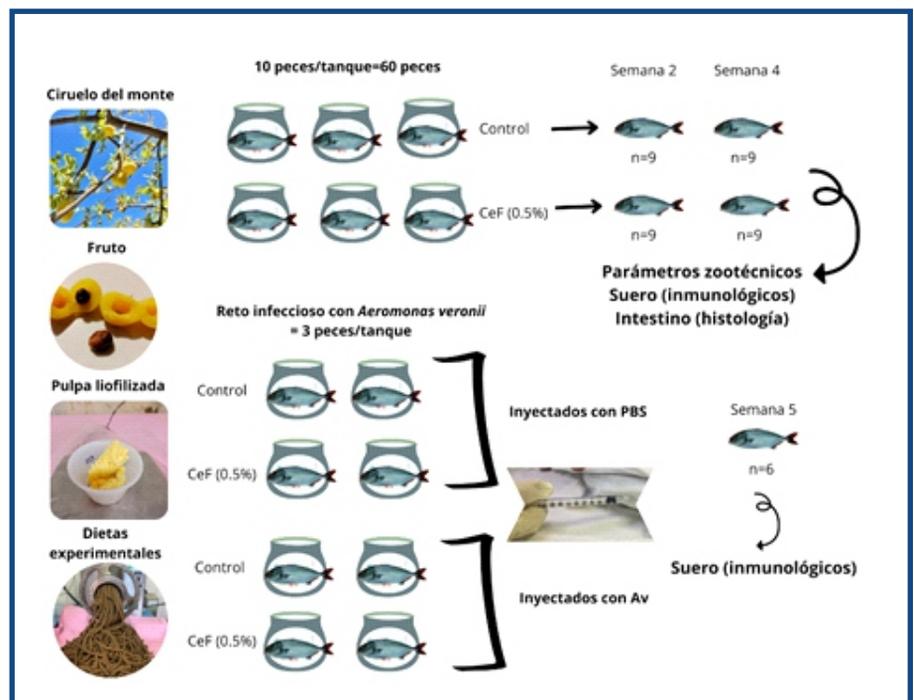


Figura 1. Ciruelo del monte, fruto, dietas y diseño experimental con juveniles de jurel *Seriola rivoliana* con muestreos a la semana 2, 4 y después del reto infeccioso con *Aeromonas veronii* (Av) (1×10^6 células/mL).



***Aeromonas veronii*: reto infeccioso**

Para el reto infeccioso se utilizó la bacteria *A. veronii* cepa A186 la cual fue ajustada a una longitud de onda de 1.0 a 600 nm lo cual corresponde a 1×10^9 células/mL. La suspensión fue diluida en fosfato buffer salino (PBS, pH 7.4) para obtener una concentración final de 1×10^6 células/mL. La bacteria A186 ha perdido virulencia, sin embargo, sí causa una inmunosupresión del sistema inmune en los peces (Reyes-Becerril, Ascencio-Valle, Macias, Maldonado, Rojas, Esteban, 2012). Para el reto, después de las cuatro semanas de alimentación con los tratamientos (control y *CeF*), los peces fueron divididos en dos grupos: control y *CeF* inyectados intraperitonealmente con solución salina (100 μ L) y un segundo grupo: control y *CeF* inyectados intraperitonealmente con 100 μ L of *A. veronii* at (1×10^6 células/mL). Cada tratamiento fue diseñado por duplicado (dos tanques por tratamiento con tres peces en cada tanque). Siete días después de la infección, los peces fueron sacrificados y se tomaron muestras de sangre para obtener suero y guardaron a 4 °C hasta su uso.

Parámetros de crecimiento

Ganancia de peso

Se determinó la ganancia de peso tomando el peso inicial y final de todos los peces. Para analizar este parámetro se utilizó la siguiente fórmula:

$$GD = \frac{\text{Peso final} - \text{Peso inicial}}{\text{Edad (días)}}$$

Tasa de crecimiento absoluta

La tasa de crecimiento absoluta fue determinada mediante la siguiente fórmula:

Tasa de incremento en peso o longitud por una unidad de tiempo

$$TCA = \frac{Pf - Pi}{t}$$

Donde:

TCA= Tasa de crecimiento absoluto.

Pf= Peso final.

Pi = Peso inicial.

t = tiempo



Análisis inmunológicos en suero

Análisis de mieloperoxidasa (MPO)

Para medir la actividad de la enzima mieloperoxidasa se siguió la metodología de Quade y Roth (1997). Se colocaron 20 μL de suero por quintuplicado en una placa de 96 pozos. Después, se añadieron 100 μL de solución de trabajo con 3,3',5,5'-tetrametilbencidina (TMB: 40 mL de agua destilada, 10 μL de peróxido de hidrógeno al 30% y una pastilla de TMB). Finalmente, se agregaron 50 μL de ácido sulfúrico 2M para detener la reacción, y la absorbancia se midió en un espectrofotómetro a 450nm.

Producción de óxido nítrico (ON)

La técnica de óxido nítrico se llevó a cabo siguiendo la metodología descrita por Neumann, Fagan, Belosevi (1995) usando el reactivo de Griess. Se vertieron 100 μL de suero por quintuplicado en una placa de 96 pozos. Posteriormente, 100 μL de reactivo de Griess (4 mg/mL) fueron añadidos y se incubó durante 15 minutos bajo protección contra la luz y a temperatura ambiente. La absorbancia se leyó a 440nm.

Enzimas antioxidantes

Superóxido dismutasa

La actividad de la enzima antioxidante superóxido dismutasa (SOD) en suero fue determinada mediante el porcentaje de inhibición de la enzima xantina oxidasa (XO), la cual está relacionada con la tasa de reducción del O_2 . El porcentaje de inhibición de la enzima XO fue determinado por un método colorimétrico siguiendo las instrucciones del kit para SOD (Sigma-Aldrich, Núm. Cat. 19160 SOD determination kit). Se midió la absorbancia a 450 nm. La actividad de la enzima SOD (% de inhibición de XO) se determinó mediante la siguiente ecuación:

$$(\% \text{ de inhibición}) = \frac{(A \text{ blanco } 1 - A \text{ blanco } 2) - (A \text{ muestra} - A \text{ blanco } 2)}{(A \text{ blanco } 1 - A \text{ blanco } 3)} \times 100 \%$$

Donde:

A= Absorbancia.



Catalasa

La actividad de catalasa fue analizada siguiendo la metodología de Clairborne (1985) usando el reactivo de Purpald. La actividad de catalasa en suero fue determinada usando la reducción de la absorbancia en presencia de H_2O_2 a 240 nm.

Análisis histológico en intestino anterior

Las secciones del intestino anterior de los peces se prepararon en parafina y se cortaron (5 μ m) para teñirlas con hematoxilina-eosina (Drury, Wallington, Cameron, Carleton, 1976). Los portaobjetos se examinaron con un microscopio óptico y se obtuvieron fotografías. Se procesaron al menos tres cortes por organismo.

Análisis estadístico

Todos los ensayos y mediciones serán llevados a cabo por quintuplicado. Los resultados expresan la media \pm desviación estándar (DE). Se realizó un análisis de varianza de una vía (ANOVA) para determinar los efectos de los tratamientos en los ensayos a realizar con una comparación de medias por la prueba de Tukey. Se consideran diferencias significativas entre los tratamientos cuando $p < 0.05$.

▶ RESULTADOS

Tasa de crecimiento

Los resultados obtenidos en la ganancia de peso muestran que no hay diferencias significativas entre los peces alimentados con la dieta control y *CeF* a la semana dos y cuatro. Sin embargo, después del reto con la bacteria *A. veronii*, se observó un incremento en la ganancia de peso en los peces alimentados con la dieta *CeF* comparados con los peces suplementados con la dieta control ($P < 0.05$) (Fig. 2a).

Respecto a la ganancia de crecimiento absoluta, se observaron diferencias significativas en los tres tiempos de muestreo con un incremento en los peces suplementados con la dieta *CeF* respecto a los peces control (Fig 2b).

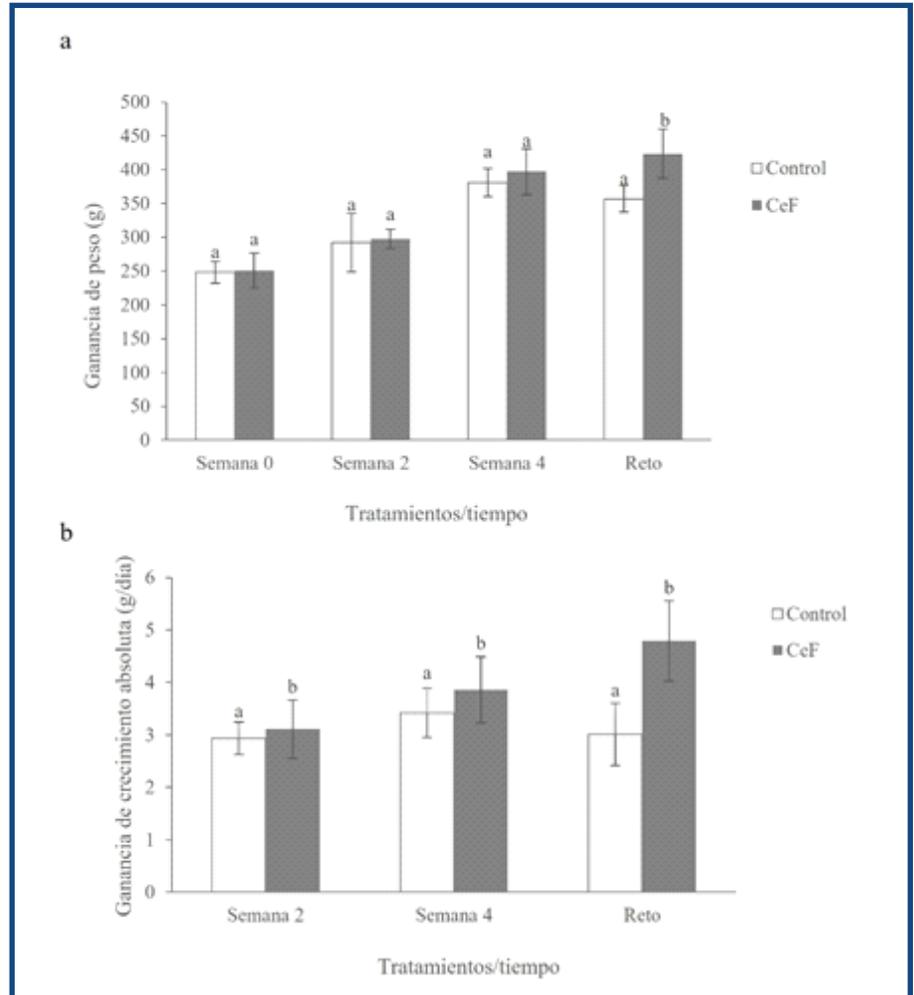


Figura 2. a) Ganancia de peso y b) Ganancia de crecimiento absoluto en peces alimentados con las dietas experimentales (control y pulpa de ciruela del monte, CeF al 0.5% en la dieta) a la semana 2 y 4, y semana 5 después del reto con *Aeromonas veronii* (1×10^6 células/mL). Los datos representan la media \pm SD. Diferentes letras denotan significancias estadísticas entre los grupos de la dieta control y la dieta con CeF ($P < 0.05$).

Reto infeccioso

La concentración utilizada para el reto infeccioso (1×10^6 células/mL) no causó mortalidad durante las 7 semanas post-infección.

Parámetros inmunológicos y actividad de enzimas antioxidantes

Respecto a los resultados en los parámetros del sistema inmune, en los tres muestreos se observó un incremento significativo en la actividad de la enzima mieloperoxidasa y la producción de óxido nítrico en el suero de peces suplementados con la dieta experimental (*CeF*) en comparación con los peces control ($P < 0.05$).

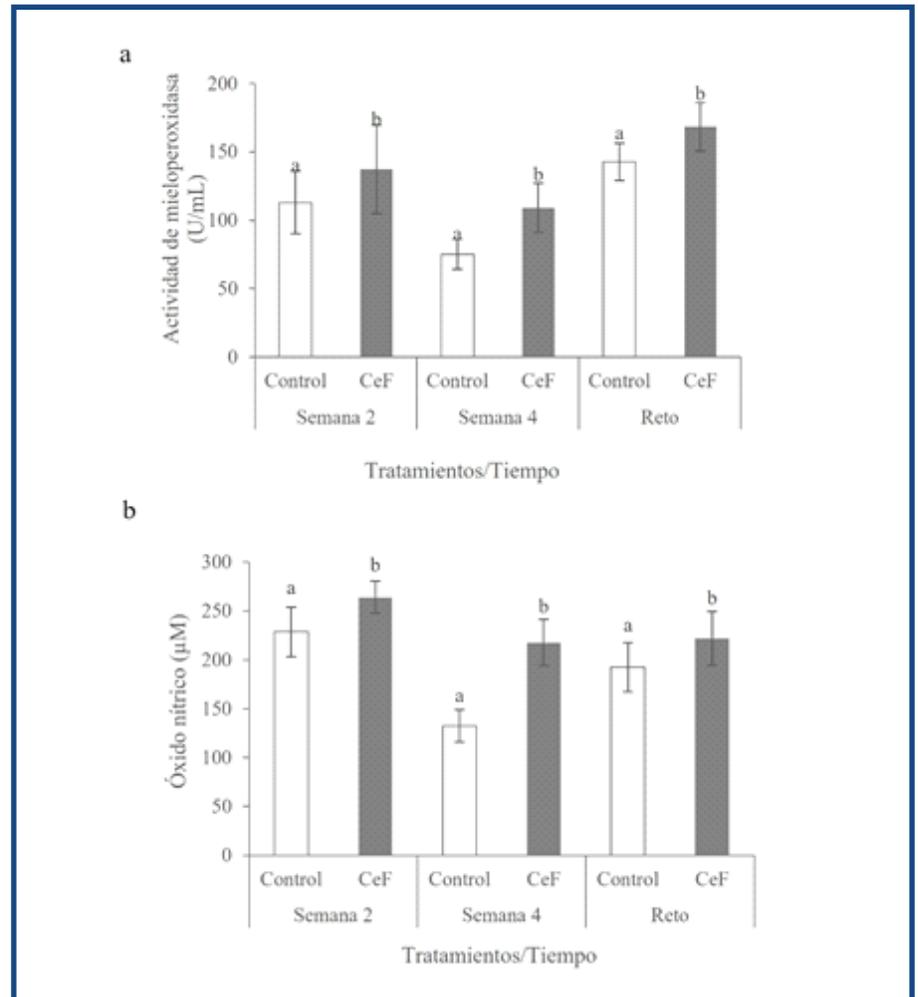


Figura 3. a) Actividad de mieloperoxidasa y b) producción de óxido nítrico en suero de peces alimentados con las dietas experimentales (control y pulpa de ciruela del monte, CeF al 0.5% en la dieta) a la semana 2 y 4, y semana 5 después del reto con *Aeromonas veronii* (1×10^6 bacterias/mL). Los datos representan la media \pm SD. Diferentes letras denotan significancias estadísticas entre los grupos de la dieta control y la dieta con CeF ($P < 0.05$).

La actividad de las enzimas antioxidantes, superóxido dismutasa y catalasa, fueron significativamente mayores en el suero de peces alimentados con la dieta rica en *CeF* a la semana dos, cuatro y después del reto en comparación con los peces alimentados con la dieta control ($P < 0.05$).

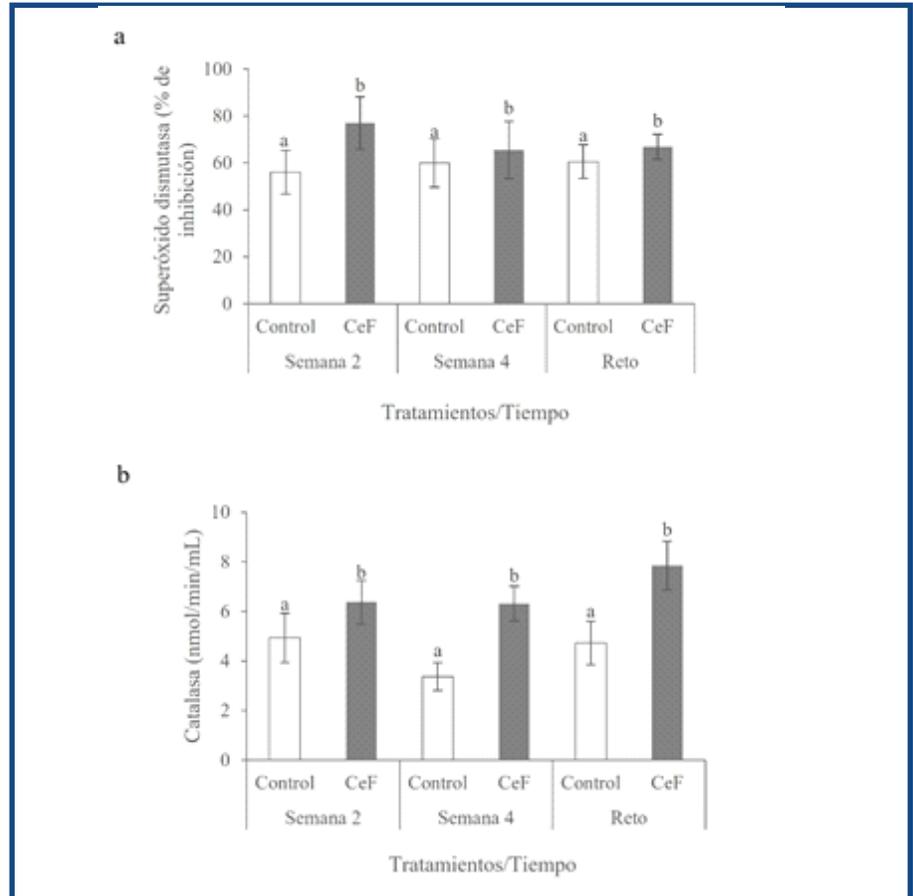


Figura 4. a) Superóxido dismutasa y b) catalasa en suero de peces alimentados con las dietas experimentales (control y pulpa de ciruela del monte, CeF al 0.5% en la dieta) a la semana 2 y 4 y semana 5 después del reto con *Aeromonas veronii* (1×10^6 células/mL). Los datos representan la media \pm SD. Diferentes letras denotan significancias estadísticas entre los grupos de la dieta control y la dieta con CeF ($P < 0.05$).

Salud intestinal

Las tinciones de los cortes histológicos de intestino anterior de los peces suplementados con *CeF* y dieta control a la semana dos y cuatro se muestran en la figura 5. Se observó que no hay un efecto inflamatorio del intestino en los peces en donde se suplementa *CeF* a las dos y cuatro semanas en comparación con el control. En las muestras de intestino de peces suplementados con *CeF* se observa un mayor número de células caliciformes con comparación con el corte histológico del intestino de los peces control.

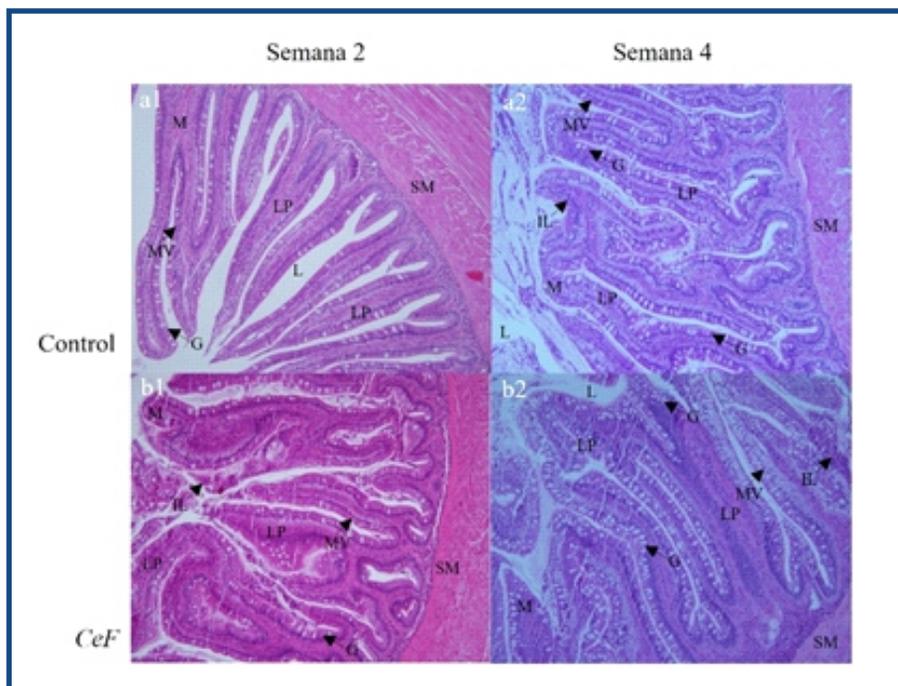


Figura 5. Análisis histológico con tinción de hematoxilina-eosina de intestino anterior de juveniles de jurel *Seriola rivoliana* alimentada con una dieta control y suplementada con pulpa de ciruela del monte (CeF) a la semana 2 y 4. LP=lamina propia; M= mucosa; SM=submucosa; MV= microvellosidades; IL=leucocitos intraepiteliales; G= células globet (caliciformes). Escala: 20x.

DISCUSIÓN

Los extractos de plantas y frutos son una alternativa viable, económica y amigable con el medio ambiente que han sido propuestos en acuicultura para aumentar la capacidad antioxidante y la inmunidad ante enfermedades (Ahmadifar, Mohammadzadeh, Kalhor, Yousefi, Moghadam, Naraballoh, 2022). La composición química, antioxidante e inocuidad del fruto de ciruela del monte fue estudiada por primera vez por Reyes-Becerril et al. (2024).

En este estudio, el efecto de dietas suplementadas con pulpa de ciruela del monte (CeF, 0.5%) en juveniles de jurel y su efecto en el crecimiento, sistema inmune y resistencia contra la bacteria *A. veronii* se analizó a las dos, cuatro y cinco semanas (después del reto). El uso de plantas medicinales y sus extractos han sido utilizados en peces para mejorar algunos parámetros zootécnicos, incluyendo la ganancia de peso (Wangkahart, Wachiraamonloed, Lee, Subramani, Qi, Wang, 2022). En



este trabajo se determinó la ganancia de peso y crecimiento absoluto en los juveniles de jurel suplementados con y sin pulpa de ciruela del monte a las dos y cuatro semanas. De manera interesante se observó un incremento en la ganancia de peso y crecimiento absoluto en los peces suplementados con *CeF* después del reto infeccioso con *A. veronii* comparado con los peces control. Este resultado concuerda por el realizado por Mahboub, Faggio, Hendam, Algharib, Alkafafy, Abo Hashem, Mahmoud, Khamis, Abdel-Ghany, Masoud, Abdel Rahman (2022), quienes observaron un incremento en la ganancia de peso al suplementar dietas enriquecidas con albaricoque en carpa común *Cyprinus carpio* y retados con *A. veronii*. En otro estudio, el efecto de la inclusión en dietas del fruto del Bel (*Eagle marmelos*) se evaluó en tilapia del Nilo (*Oreochromis niloticus*) y se observó un incremento en la ganancia de peso a las ocho semanas comparada con los peces alimentados con la dieta control (Wangkahart et al., 2022). En la última década, una gran cantidad de estudios se han enfocado en el uso de plantas medicinales y sus extractos en acuicultura debido a su potencial antioxidante, anti-inflamatorio, e inmunoestimulante atribuido principalmente a sus compuestos fitoquímicos, termino colectivo que hace referencia a sus compuestos químicos o metabolitos secundarios. Este estudio se enfocó principalmente en el efecto inmunoestimulante (aumento de los parámetros del sistema inmune) en los peces suplementados con dietas ricas en pulpa de ciruela del monte antes y después del reto. Parámetros de mieloperoxidasa, óxido nítrico, superóxido dismutasa y catalasa fueron analizados en suero a las 2 y 4 semanas y después del reto infeccioso en todos los peces. En este estudio se observó un incremento de la enzima mieloperoxidasa y la producción de óxido nítrico en suero de peces alimentados con *CeF* en todos los muestreos, incluyendo después de la infección con la bacteria. Mieloperoxidasa es una enzima que se encuentra principalmente en los neutrófilos (principales células fagocíticas del sistema inmune) que en presencia de peróxido de hidrógeno y el ión cloro cataliza la formación de intermediarios de oxígeno incluyendo el ácido hipocloroso (altamente microbicida), formando parte del sistema inmune innato y la defensa contra microorganismos patógenos (Aratani, 2018). Por otro



lado, el óxido nítrico en presencia de O_2^- dentro de los macrófagos resulta en la formación de peroxinitritos con actividad antimicrobiana para los patógenos (Bogdan, 2001). Recientemente la pulpa de ciruela del monte fue analizada por Cromatografía de Gases/Espectrometría de Masas (GC/MS) encontrando un alto contenido de carbohidratos como D-Psicofuranosa (D-psicosa), maltosa, Beta-D-Allopiranosa, D-trehalosa, además de polioles como el dulcitol y fitoesteroles como el β -Sitosterol. Los carbohidratos han sido ampliamente estudiados por su efecto en la modulación del sistema inmune (Crocker y Feizi, 1996). Gong, Yang, Jiang, Zheng, Peng (2020) observaron que el ácido L-aspártico promueve la producción de óxido de nitrógeno y mejora la fagocitosis incrementando la supervivencia en el pez cebra *Danio rerio* contra *Vibrio alginolyticus*. En otro estudio, Jiang, Yang, Chen, Lai, Zheng, Peng (2020) observaron que la maltosa exógena mejora la respuesta inmune del pez cebra a Lev-R-*V. alginolyticus* (levofloxacina-resistente a *V. alginolyticus*) al incrementar la expresión de lisozima, lo que lleva a una mejor eliminación de la infección. La maltosa puede transportarse al interior de la célula y degradarse a glucosa, donde ingresa a la vía de la glucólisis.

En este mismo estudio se observó un incremento en las enzimas antioxidantes superóxido dismutasa y catalasa en los jureles alimentados por cuatro semanas con pulpa de ciruela del monte y después del reto con *A. veronii*. Las enzimas antioxidantes tienen la función de convertir a los radicales libres como el anión superóxido o el peróxido de hidrógeno en radicales menos tóxicos como el agua y el oxígeno. Un estudio similar realizado por Assar, Ragab, Abdelsatar, Salah, Salem, Hendam (2024) evaluaron extractos de hoja de olivas en carpas infectadas con *A. hydrophila* y observaron un incremento en la modulación de las defensas antioxidantes como superóxido dismutasa y glutatión peroxidasa. La pulpa de la ciruela del monte es rica en fitoesteroles como el β -Sitosterol. El β -sitosterol es el segundo fitosterol más importante y tiene una estructura similar a la del colesterol, interesantemente se ha observado en diferentes estudios sus propiedades biológicas como inhibir el crecimiento de varios tipos específicos de células tumorales *in vitro* (Jayaprakash, Mandadi, Poulouse 2007) modula enzimas antioxidantes



en la patogénesis (Vivancos y Moreno 2005), detención de células en la fase G2/M en células de cáncer de próstata y disminución de la generación de radicales libres *in vitro* (Awad, Andrew, Carol 2005).

Finalmente, en este estudio se evaluó el efecto de la pulpa de ciruela del monte a la semana dos y cuatro sobre la salud intestinal de los jureles y se confirmó por medio de cortes histológicos que las dietas suplementadas con pulpa de ciruela del monte no causan daño en la mucosa intestinal (inflamación o presencia de centros melanomacrófagos). Además, se detectó una mejora en la apariencia morfológica con el incremento de células caliciformes en las vellosidades intestinales asociadas con la implementación de *CeF*. La función de las células caliciformes es la secreción de moco formando una capa protectora sobre el epitelio, una baja producción de moco está asociado con infecciones o condiciones inflamatorias (Gustafsson, Johansson, 2022). La mayoría de los fitoquímicos, se encuentran en los vegetales en formas glicosiladas y estos son deglicosilados en su mayoría por las bacterias del colon generando ácidos grasos volátiles, por lo que el metabolismo completo de los fitoquímicos requiere de consorcios microbianos. Los fitoquímicos ejercen sus efectos benéficos para la salud en el tubo digestivo o a través de sus efectos prebióticos sobre la microbiota intestinal secretando metabolitos bacterianos bioactivos actuando a nivel sistémico como local (Gasaly, Naschla, Riveros, Karla, Gotteland, Martín 2020).

De esta manera, con este estudio se concluye que la suplementación de pulpa de ciruela del monte en dietas para juveniles de jurel *Seriola rivoliana* no sólo mejora los parámetros de crecimiento en los peces, si no que confiere protección contra la bacteria *A. veronii* estimulando el sistema inmune debido a sus compuestos químicos y potencial antioxidante siendo una alternativa de uso en la industria acuícola.



▶ AGRADECIMIENTOS

El autor agradece el apoyo técnico de Pablo Monsalvo, Carlos Ceseña, Francisco Encarnación Ramírez, Roxana Inohuye Rivera y Mauricio Moreno Alva por su apoyo con los peces. También agradece a la Dra. Carmen Rodríguez Jaramillo y a Eulalia Meza Chávez por su apoyo con los análisis histológicos. Este estudio fue apoyado por la Dra. Minerva Maldonado y el proyecto a su cargo CONAHCYT PRONACES PRONAI soberanía Alimentaria 321279.

▶ LITERATURA CITADA

- Abu-Zahra N.I.S., ElShenawy A.M., Ali G.I.E., Al-sokary E.T., Mousa M.A., El-Hady H.A.M. A. (2024).** *Mentha piperita* powder enhances the biological response, growth performance, disease resistance, and survival of *Oreochromis niloticus* infected with *Vibrio alginolyticus*, *Aquaculture International*, 32 6353–6379. <https://doi.org/10.1007/s10499-024-01469-5>.
- Adese, D.A., Song, C., Sun, C., Liu, B., Liu, B., Zhou, Q. (2022).** The role of currently used medicinal plants in aquaculture and their action mechanisms: a review. *Review Aquactic*, 14, 816-847. <https://doi:10.1111/raq.12626>
- Ahmadifar, E., Mohammadzadeh, S., Kalhor, N., Yousefi, M., Moghadam, M.S., Naraballoh, W. (2022)** Cornelian cherry (*Cornus mas* L.) fruit extract improves growth performance, disease resistance, and serum immune-and antioxidant-related gene expression of common carp (*Cyprinus carpio*). *Aquaculture*, 558, 738372. <https://doi.org/10.1016/J.AQUACULTURE.2022.738372>
- Aratani, Y. (2018).** Myeloperoxidase: Its role for host defense, inflammation, and neutrophil function. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 640, 47-52. <https://doi:10.1016/j.abb.2018.01.004>
- Assar, D. H., Ragab, A. E., Abdelsatar, E., Salah, A. S., Salem, S. M. R., Hendam, B. M., (2023).** Dietary olive leaf extract differentially modulates antioxidant defense of normal and *Aeromonas hydrophila*-infected common carp (*Cyprinus carpio*) via Keap1/Nrf2 pathway signaling: a phytochemical and biological link. *Animals*, 13, 2229. <https://doi:10.3390/ani13132229>



- Awad, A.B., Andrew, T.B., Carol, S.F. (2005).** Effect of resveratrol and b-sitosterol in combination on reactive oxygen species and prostaglandin release by PC-3 cells. *Prostaglandins Leukot Essent Fatty Acids* 72, 219-226. <https://doi:10.1016/j.plefa.2004.11.005>
- Bogdan, C. (2001).** Nitric oxide and the immune response. *Nature Immunology*. 2, 907-916. <https://doi:10.1038/ni1001-907>
- Clairborne, A. (1985)** Catalase activity. In: Greenwald RA (ed) CRC handbook of methods for oxygen radical research. CRC Press, Boca Raton, pp 283-284.
- Crocker, P. R., Feizi, T. (1996).** Carbohydrate recognition systems: functional triads in cell-cell interactions. *Current Opinion in Structural Biology*, 6, 679-691. [https://doi:10.1016/s0959-440x\(96\)80036-4](https://doi:10.1016/s0959-440x(96)80036-4).
- Drury, R.A.B., Wallington E.A., Cameron R., Carleton's Histological Technique, Oxford University Press, Oxford, London, 1976, p. 233.**
- Encarnación D.R, Virgen, M., Ochoa, N. (1998)** Antimicrobial activity of medicinal plants from Baja California Sur (México). *Pharmaceutical Biological* 36, 1. <https://doi.org/10.1076/phbi.36.1.33.4625>
- Escobedo-Hinojosa, W.I., del Carpio, J.D., Palacios-Espinosa, J.F., Romero, I. (2012)** Contribution to the ethnopharmacological and anti-*Helicobacter pylori* knowledge of *Cyrtocarpa procera* Kunth (Anacardiaceae). *Journal Ethnopharmacology*, 143, 363-371. <https://doi.org/10.1016/j.jep.2012.07.001>
- Gasaly, Naschla, Riveros, Karla, Gotteland, Martín. (2020).** Fitoquímicos: una nueva clase de prebióticos. *Revista chilena de nutrición*, 47, 317-327. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-75182020000200317>
- Ghada, A., El-Gammal, Gehan, I.E. Ali, Aly, S., Saif, Shaimaa, Elbaz, Sabreen, E., Fadl, Nagwa, I.S. Abu-Zahra. (2025).** The immunomodulatory and antioxidative effects of curcumin-supplemented diets against the isolated *Aeromonas hydrophila* in *Oreochromis niloticus*. *Fish and Shellfish Immunology*, 157, 110077. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.110077>.
- Gong, Q., Yang, D., Jiang, M., Zheng, J., Peng, B. (2020).** l-aspartic acid promotes fish survival against *Vibrio alginolyticus* infection through nitric oxide-induced phagocytosis. *Fish Shellfish Immunol* 97, 359-366. <https://doi.10.1016/j.fsi.2019.12.061>
- Gustafsson, J.K., Johansson, M.E.V. (2022).** The role of goblet cells and mucus in intestinal homeostasis. *Natural Review Gastroenterology Hepatology* 19, 785-803. <https://doi.org/10.1038/s41575-022-00675-x>



- Jayaprakash, G.K., Mandadi, K.K., Poulouse, S.M., (2007).** Inhibition of colon cancer cell growth and antioxidant activity of bioactive compounds from *Poncirus trifoliata* (L.) Raf. *Bioorg Med Chem* 14, 4923-4932. <http://doi:10.1016/j.bmc.2007.04.044>
- Jiang, M, Yang, L, Chen, Z.G., Lai, S.S., Zheng, J., Peng, B. (2020).** Exogenous maltose enhances Zebrafish immunity to levofloxacin-resistant *Vibrio alginolyticus*. *Microb Biotechnol.* 13, 1213-1227. <http://doi:10.1111/1751-7915.13582>.
- León de la Luz, J.L., Pérez-Navarro, J.J. (2007).** A new variety of *Cyrtocarpa edulis* (Brandegee) Standley (Anacardiaceae). *Acta Botánica Mexicana* 79, 63-67. <https://doi.org/10.21829/abm79.2007.1038>
- Machuca, C., Angulo, M., Monreal-Escalante, E., Méndez-Martínez, Y., Magallón-Servín, P., Vázquez-Juárez, R., Silva-Jara, J.M., Angulo, C. (2024).** Effect of diets containing probiotic yeast *Cystobasidium benthicum* and fruit *Cyrtocarpa edulis* on growth and immune parameters of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Microbial Pathogenesis* 194, 106817. <https://doi:10.1016/j.micpath.2024.106817>.
- Mahboub, H.H., Faggio, C., Hendam, B.M., Algharib, S.A., Alkafafy, M., Abo Hashem, M., Mahmoud, Y.K., Khamis, T., Abdel-Ghany, H.M., Masoud, S.R., Abdel Rahman, A.N. (2022).** Immune-antioxidant trait, *Aeromonas veronii* resistance, growth, intestinal architecture, and splenic cytokines expression of *Cyprinus carpio* fed *Prunus armeniaca* kernel-enriched diets. *Fish and Shellfish Immunology* 124:182-191. <https://doi:10.1016/j.fsi.2022.03.048>.
- Neumann, N.F., Fagan, D., Belosevi, M. (1995)** Macrophage activating factor (s) secreted by mitogen stimulated goldfish kidney leukocytes synergize with bacterial lipopolysaccharide to induce nitric oxide production in teleost macrophages. *Developmental and Comparative Immunology* 19, 473-482. [https://doi.org/10.1016/0145-305x\(95\)00032-0](https://doi.org/10.1016/0145-305x(95)00032-0)
- Palanikani, R., Chanthini, K.M.P., Soranam, R., Thanigaivel, A., Karthi, S., SenthilNathan S., Murugesan, A.G. (2020).** Efficacy of *Andrographis paniculata* supplements induce a non-specific immune system against the pathogenicity of *Aeromonas hydrophila* infection in Indian major carp (*Labeo rohita*). *Environmental Science Pollution Resource*, 27, 23420-23436. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-05957-7>.
- Quade, M.J., Roth, J.A. (1997).** A rapid, direct assay to measure degranulation of bovine neutrophil primary granules. *Veterinary Immunology and Immunopathology*, 58, 239-248. [https://doi.org/10.1016/s0165-2427\(97\)00048-2](https://doi.org/10.1016/s0165-2427(97)00048-2)



- Rawat, P., Kaur, V.I., Tyagi, A., Norouzitallab, P., Baruah, K. (2022).** Determining the efficacy of ginger *Zingiber officinale* as a potential nutraceutical agent for boosting growth performance and health status of *Labeo rohita* reared in a semi-intensive culture system. *Frontier Physiology*, 15, 960897. <https://doi:10.3389/fphys.2022.960897>.
- Reyes-Becerril, M., Maldonado-García, M., López M.G., Calvo-Gómez O., Díaz, S.M, (2024).** *Cyrtocarpa edulis* fruit and its immunostimulant effect on Almaco Jack *Seriola rivoliana*: *in vitro*, *in vivo* and *ex vivo* studies, *Veterinary Research Communication*, 1-15, <https://doi.org/10.1007/s11259-024-10309-Z>.
- Reyes-Becerril, M., Ascencio-Valle, F., Macias, M.E., Maldonado, M., Rojas, M., Esteban, M.Á. (2012).** Effects of marine silages enriched with *Lactobacillus sakei* 5-4 on haemato-immunological and growth response in Pacific red snapper (*Lutjanus peru*) exposed to *Aeromonas veronii*. *Fish and Shellfish Immunology*, 33, 984-992. <https://doi:10.1016/j.fsi.2012.08.014>.
- Serrano-Pinto, V., Bernay, B., Moreno-Legorreta, M., Ortega-Rubio, A., Maldonado-García, M, (2020).** Egg proteomic characterization of *Seriola rivoliana* in captivity. *Latin American Journal Aquatic Research*, 48,877-885. <https://doi.org/10.3856/vol48-issue5-fulltext-2385>
- Tadese, D. A., Song, C., Sun, C., Liu, B., Liu, B., Zhou, Q, (2022).** The role of currently used medicinal plants in aquaculture and their action mechanisms: a review. *Review Aquatic*, 14, 816-847. <https://doi:10.1111/raq.12626>
- Velázquez-Carriles, C.A., Angulo, C., Macías-Rodríguez, M.E., Reyes-Becerril, M. (2025).** Phytochemical properties of *Cyrtocarpa edulis* peel exert antimicrobial activity and enhance immunobiological parameters in Almaco jack *Seriola rivoliana* cells. *Fish and Shellfish Immunology*, 156, 110044. <https://doi.org/10.1016/j.fsi.2024.110044>
- Vivancos, M., Moreno, J.J. (2005).** Beta-Sitosterol modulates antioxidant enzyme response in RAW 264.7 macrophages. *Free Radical Biol Med* 39, 91-97. <https://doi:10.1016/j.freeradbiomed.2005.02.025>
- Wangkahart, E., Wachiraamonloed, S., Lee, P.T., Subramani, P.A., Qi, Z., Wang, B. (2022).** Impacts of *Aegle marmelos* fruit extract as a medicinal herb on growth performance, antioxidant and immune responses, digestive enzymes, and disease resistance against *Streptococcus agalactiae* in Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). *Fish and Shellfish Immunology*, 120, 402-410. <https://doi:10.1016/j.fsi.2021.11.015>.



Artículo Científico

Variabilidad en la temperatura de la actividad hidrotermal submarina en la Bahía de Banderas: Análisis a corto plazo

Temperature variability of submarine hydrothermal activity in Banderas Bay: Short-term analysis

latindex



CREATIVE COMMONS

OPEN ACCESS

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el origina



1. María Carolina Rodríguez-Urbe

0000-0002-6849-0910

Departamento de Ciencias Exactas, Centro Universitario de la Costa, Universidad de Guadalajara, Av. Universidad de Guadalajara 203, CP 48280, Puerto Vallarta, Jalisco, México.

Autor de correspondencia: maria.ruribe@academicos.udg.mx



Variabilidad en la temperatura de la actividad
hidrotermal submarina en la Bahía de Banderas:
Análisis a corto plazo

Temperature variability of submarine
hydrothermal activity in Banderas Bay:
Short-term analysis

► RESUMEN

La actividad hidrotermal submarina en la Bahía de Banderas es un fenómeno de interés científico debido a su influencia en los ecosistemas marinos locales y su potencial para aplicaciones tecnológicas. Este estudio describe los resultados de dos campañas de muestreo realizadas en 2017 y 2023, en las que se utilizaron sensores HOBO™ Pendant™ para registrar la temperatura de la actividad hidrotermal. La primera campaña enfrentó fallos en los materiales y métodos, mientras que en la segunda se implementaron mejoras que permitieron obtener registros exitosos. De esta forma fue posible analizar la variabilidad de la temperatura en un periodo de 53 días, del 9 de septiembre al 31 de octubre de 2023. Los resultados obtenidos muestran una perspectiva inicial en la dinámica de la temperatura de esta actividad hidrotermal y se recomienda que en futuras investigaciones se incluyan monitoreos de temperatura y otros factores a largo plazo.

Palabras clave: marea, chimenea hidrotermal, series de tiempo, sensores, monitoreo.

► ABSTRACT

Submarine hydrothermal activity at Banderas Bay is a phenomenon of scientific interest due to its influence on local marine ecosystems and its potential for technological applications. This study describes two sampling campaigns conducted in 2017 and 2023, in which HOBO™ Pendant™ sensors were used to record the temperature of hydrothermal



activity. The first campaign faced failures in materials and methods, while the second implemented improvements that allowed successful recordings. Thus, it was possible to analyze temperature variability over a period of 53 days, from September 9 to October 31, 2023. The results obtained provide an initial perspective on the temperature dynamics of this hydrothermal activity and it is recommended that future research include long-term monitoring of temperature and other factors.

Keywords: tide, hydrothermal vent, time series, sensors, monitoring.

► INTRODUCCIÓN

En las profundidades de los océanos se puede encontrar actividad hidrotermal, tanto profunda (> 200 m) como somera (< 200 m) (Prol-Ledesma & Canet, 2014; Tarasov et al., 2005). Por lo general es en las dorsales oceánicas donde se localiza la actividad hidrotermal profunda (AHP), mientras que la actividad hidrotermal somera (AHS) se asocia mayormente con volcanes submarinos (Tarasov et al., 2005). Pero existen excepciones, como lo son los Sistemas Hidrotermales Submarinos Someros (SHSS) reportados en el Pacífico mexicano, los cuales están asociados con márgenes continentales afectados por procesos activos de extensión tectónica (Arellano-Ramírez *et al.*, 2017; López-Sánchez *et al.*, 2006; Núñez-Cornú *et al.*, 2000; Prol-Ledesma *et al.*, 2004; Prol-Ledesma & Canet, 2014; Vidal *et al.*, 1978), incluido el Sistema Hidrotermal Submarino Somero localizado en la Bahía de Banderas (SHSSBB), Nayarit, México.

De acuerdo con Barreyre et al. (2014), las descargas hidrotermales (DH) se clasifican en dos tipos: i) DH focalizadas de alta temperatura ($> 100^{\circ}\text{C}$, comúnmente entre 300°C y hasta aproximadamente 400°C) y ii) DH difusas de baja temperatura (generalmente $< 100^{\circ}\text{C}$). Las temperaturas en las DH focalizadas pueden mantenerse muy estables durante largos periodos, incluso varios años (Fornari et al., 1998; Langmuir et al., 1997; Larson et al., 2009; Scheirer et al., 2006;), por el contrario, las DH difusas presentan una alta variabilidad en sus mediciones (Scheirer et al., 2006; Sohn, 2007; Tivey et al., 2002). Esta



diferencia se relaciona con los sistemas de circulación (Barreyre et al., 2014). Las DH focalizadas, debido a sus altas temperaturas, se asociarían con AHP, mientras que las DH difusas se asocian con AHS, la cual por lo general está vinculada a actividad volcánica submarina somera (Barreyre et al., 2014; Tarasov et al., 2005), grietas o fallas del fondo marino o con depósitos minerales (Barreyre et al., 2014; Corliss et al., 1979).

La temperatura es una de las variables más comúnmente monitoreadas en los sistemas hidrotermales submarinos debido a la facilidad de las mediciones y la estabilidad de los sensores frente a condiciones corrosivas (Aliani et al., 2004). Además, la temperatura de las descargas hidrotermales submarinas varía con el tiempo (Aliani et al. 2004; Foucher et al., 1992; Kinoshita et al., 1996; Schultz et al., 1996) y conocer esta dinámica en la temperatura es relevante tanto para determinar la distribución y comportamiento de las comunidades biológicas que habitan en este tipo de ambientes (Cardigos et al., 2005; Couto et al., 2015; Dando et al., 1995; Fujiwara et al., 1998; Máquez-Mendez, 2008; Melwani & Kim, 2008; Momma et al., 1998; Rodríguez-Uribe et al., 2023; Rodríguez-Uribe et al., 2024) como para monitorear la geoquímica de los fluidos hidrotermales y sus interacciones con el agua marina (Aliani et al. 2004; Chevalloné et al., 1991; Stüben et al., 1996).

Se han realizado diversas investigaciones sobre el monitoreo de la temperatura en sistemas hidrotermales profundos, utilizando tecnologías avanzadas como vehículos de inmersión profunda, por ejemplo, el sumergible *Alvin* (Fornari et al., 1998; Goto et al., 2002; Rinke & Lee, 2009; Scheirer et al., 2006; Tivey et al., 2002) y sondas de alta precisión y durabilidad que permiten registrar datos por periodos de hasta cinco años (Fornari et al., 1998). Estas investigaciones han generado un conocimiento sobre la dinámica de las temperaturas de los fluidos descargados en ambientes hidrotermales profundos (Barreyre et al., 2014; Ding et al., 2001; Du et al., 2020; Fornari et al., 1998; Goto et al., 2002; Kelley et al., 2014; Lee et al., 2015; Li et al., 2018; Liao et al., 2016; Mittelstaedt et al., 2012; Rinke & Lee, 2009; Scheirer et al., 2006;



Tivey et al., 2002). También, se han realizado investigaciones en sistemas hidrotermales someros (Aliani et al., 1998, 2004; Carlino et al., 2016; Wenzhöfer et al., 2000) donde, por lo general sus registros han sido de corto plazo y utilizando sensores de temperatura instalados mediante buceo autónomo. Sin embargo, estos estudios presentan limitaciones metodológicas en cuanto a la duración y las condiciones de instalación de los sensores en estos entornos dinámicos.

El presente trabajo tiene como objetivo reportar mediciones continuas de la temperatura de la actividad hidrotermal en el SHSSBB en un periodo de corto plazo de 53 días. Asimismo, se busca documentar las experiencias obtenidas en la instalación de los sensores de temperatura con el propósito de identificar los materiales y métodos más efectivos para el monitoreo de la temperatura en estos ambientes hidrotermales someros.

► MATERIALES Y MÉTODOS

El SHSSBB se localiza a una profundidad de 9 m y a 400 m de la playa Punta Pantoque, Nayarit, México, su influencia hidrotermal abarca aproximadamente un área de 1 km² (Canet & Prol-Ledesma, 2006). Las descargas hidrotermales en el SHSSBB son tanto concentradas como difusas (Prol-Ledesma et al., 2002) (Figura 1a). Los fluidos descargados están compuestos de líquidos y gases. El gas está compuesto principalmente de N₂ (88%) y CH₄ (12%), mientras que el líquido descargado es agua meteórica que se mezcla con el agua marina al momento de la descarga (Prol-Ledesma et al., 2002). Las burbujas de gas suben por toda la columna de agua hasta romper en la superficie marina (Figura 1b). Se seleccionaron tres sitios con chimeneas hidrotermales activas (sitio 1 (S1): 20°44'54.7" N, 105°28'40.6" W; sitio 2 (S2): 20°44'54.8" N, 105°28'40.4" W; y sitio 3 (S3): 20°44'54.9" N, 105°28'38.4" W) (Figura 2). Para registrar la temperatura de la actividad hidrotermal en cada sitio se instalaron sensores HOBOTM PendantTM de dos canales y 10 bit modelo UA-002-08, en las aberturas de las chimeneas hidrotermales.

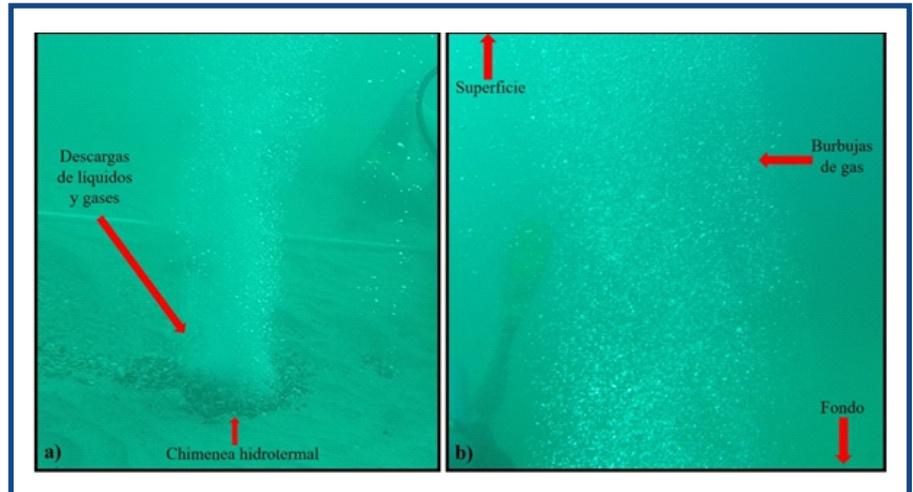


Figura 1. (a) Chimenea del sitio 1 (S1) en el Sistema Hidrotermal Submarino Somero ubicado en la Bahía de Banderas (SHSSBB) al momento de una descarga hidrotermal de líquidos y gases. (b) Burbujas de gas subiendo por la columna de agua, provenientes de una descarga hidrotermal.

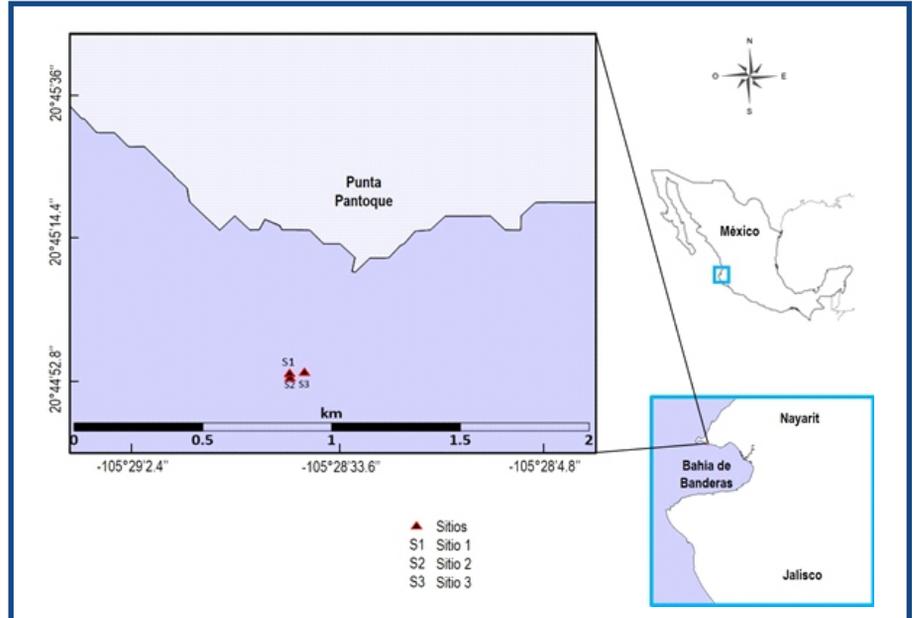
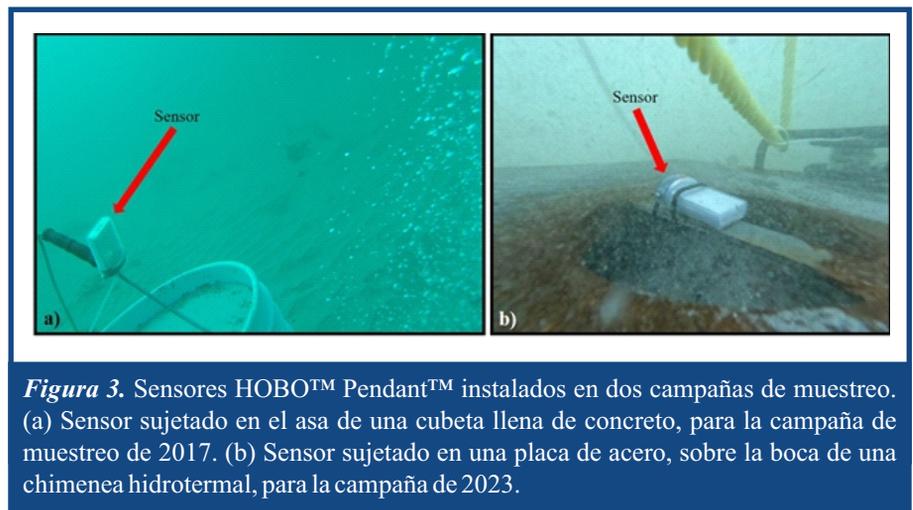


Figura 2. Localización de los sitios de estudio dentro del Sistema Hidrotermal Submarino Somero en la Bahía de Banderas, Nayarit, México.

Se realizaron dos campañas de muestreo una en 2017 y la otra en 2023. En la primera se utilizaron, como anclas para los sensores, cubetas de plástico de 20 litros (38 cm de alto x 30 cm de diámetro) con concreto sólido, peso aproximado de 48 kg, y en la agarradera de metal se sujetaron los sensores HOBOTM PendantTM (Figura 3a). Mediante buceo autónomo estas cubetas se instalaron en las bocas de cada chimenea de estudio, y los sensores fueron programados para registrar la temperatura a intervalos de 30 minutos. En la segunda campaña de muestreo se elaboraron tres placas de acero de 40 cm x 40 cm y grosor de 2.54 cm con un peso aproximado de 50 kg, en el centro se les realizó un corte circular de 15 cm de diámetro, en el cual se soldó una solera de 15 cm x 2.54 cm, que es en donde se sujetarían los sensores (Figura 2b). Mediante buceo autónomo estas placas se instalaron en las bocas de cada chimenea de estudio, y los sensores fueron programados para registrar la temperatura a intervalos de 30 minutos. Para programar los sensores HOBOTM PendantTM y descargar los datos registrados se utilizó el software HOBOWare®.



► RESULTADOS

En la campaña de muestreo de 2017, se instaló un sensor HOBOTM PendantTM (n=3) en cada sitio de estudio utilizando cubetas de plástico de 20 litros llenas con concreto sólido a manera de anclas. Sin embargo, no se obtuvo registro alguno debido a fallos en el diseño de las anclas y a

su instalación. La altura de las cubetas generó resistencia frente a las corrientes de fondo, lo que provocó que fueran desplazadas de sus puntos de instalación. Además, las asas metálicas de las cubetas donde se sujetaron los sensores sufrieron corrosión, lo que resultó en la pérdida de los sensores.

En la campaña de 2023, se realizaron modificaciones en el diseño de las anclas, instalando los sensores HOBO™ Pendant™ en placas de acero. El 9 de septiembre de 2023 se instaló un sensor en cada uno de los tres sitios de estudio (S1, S2 y S3). Los sensores se programaron a intervalos de 30 minutos y cada uno registró un total de 2,516 datos. Registraron del 9 de septiembre a las 14:00 h hasta el 31 de octubre de 2023 a las 23:30 h. Durante este periodo, para el sitio S1 la temperatura máxima registrada fue de 85.56°C, la mínima de 31.88°C y el promedio de 40.73°C (Figura 4a). Para el sitio S2 la temperatura máxima registrada fue de 34.69°C, la mínima de 29.551°C y el promedio de 31.93°C (Figura 4b). Mientras que para el sitio S3 la temperatura máxima registrada fue de 33.12°C, la mínima de 29.552°C y el promedio de 31.44°C (Figura 4c).

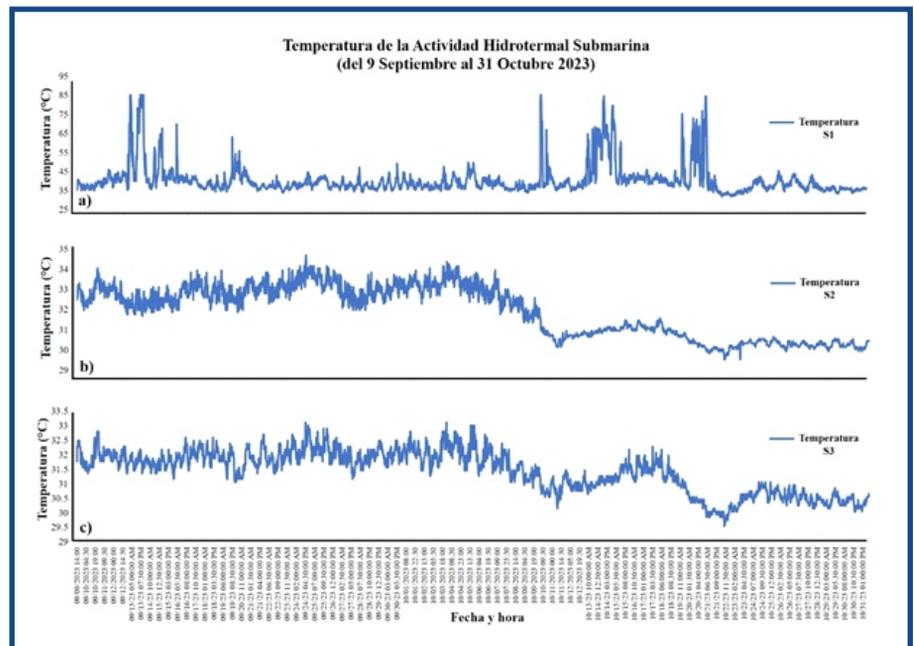


Figura 4. Registro de temperatura de la actividad hidrotermal en los tres sitios de estudio. (a) Temperatura del sitio 1 (S1). (b) Temperatura del sitio 2 (S2). (c) Temperatura del sitio 3 (S3). Registros del 9 de septiembre a las 14:00 h hasta el 31 de octubre de 2023 a las 23:30 h.

Posteriormente, el 25 de noviembre de 2023, se realizó una prueba para registrar la temperatura de la actividad hidrotermal a intervalos más cortos y determinar la duración de la batería de los sensores para lo cual cada sensor se programó para registrar datos a intervalos de un segundo. Sin embargo, los sensores de los sitios S1 y S3 sufrieron daños debido a que el agua marina logró filtrarse en su interior y dejaron de funcionar. Este problema ocurrió porque, tras reemplazar las baterías en el laboratorio, ya no quedaron correctamente sellados. Mientras que el sensor del sitio S2, que era nuevo, funcionó adecuadamente y sí logró el registro de datos. El registro en este sitio (S2) se extendió por un periodo de ocho horas, dos minutos y 31 segundos, limitado por la duración de la batería del sensor. La medición inició a las 13:00:00 h y terminó a las 21:02:31 h del mismo día con un total de 28,952 datos registrados (Figura 5). Para este periodo, la temperatura máxima registrada fue de 36.84°C, la mínima de 32.19°C y el promedio de 34.31°C.

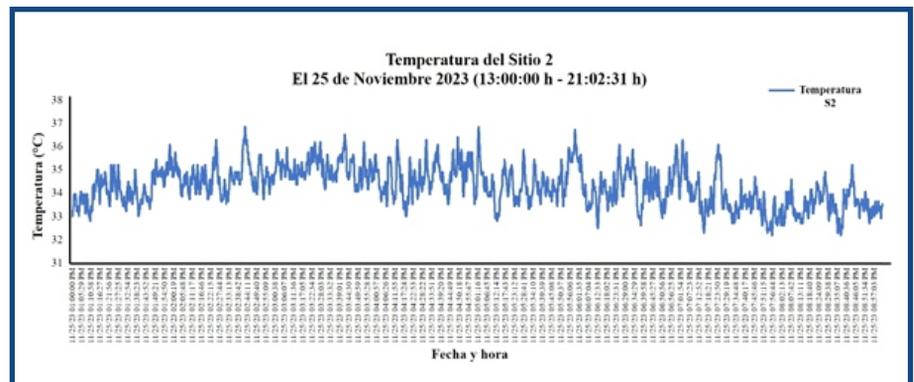


Figura 5. Registro de temperatura de la actividad hidrotermal del sitio S2. Registrado el 25 de noviembre de 13:00:00 h a 21:02:31 h.

► DISCUSIÓN

Los registros de temperatura de la actividad hidrotermal durante la campaña del año 2023, mostraron que el sitio S1 presentó las temperaturas más altas, alcanzando un máximo de hasta 85.56°C, y un promedio de 40.73°C. Además, se identificaron hasta 15 episodios continuos de descargas hidrotermales con temperaturas superiores a los

60°C, y hasta 35 episodios con temperaturas superiores a los 30°C (Figura 4a). Por ejemplo, la figura 6 muestra un periodo de intensa actividad hidrotermal de hasta cuatro horas, comenzando a las 8:00 h con una temperatura de 46.21°C, llegando a la máxima registrada de 85.564°C y terminando a las 12:00 h con 40.53°C. Mientras que los sitios S2 y S3 (Figuras 4b y 4c) mostraron patrones de temperatura similares entre ellos, aunque considerablemente más bajos en comparación con las temperaturas registradas en el sitio S1. Estos resultados podrían atribuirse a los patrones de circulación subsuperficial del flujo hidrotermal a través de las fracturas debajo del lecho marino o también podría deberse a que las placas no fueron colocadas correctamente sobre las bocas de las chimeneas en esos dos sitios porque efectivamente se aprecian episodios de actividad hidrotermal con temperaturas de hasta 34.69°C y 33.12°C, respectivamente, las cuales son superiores a las temperaturas ambiente. Además, las altas temperaturas de las descargas hidrotermales se disipan rápidamente al entrar en contacto con la columna de agua circundante.

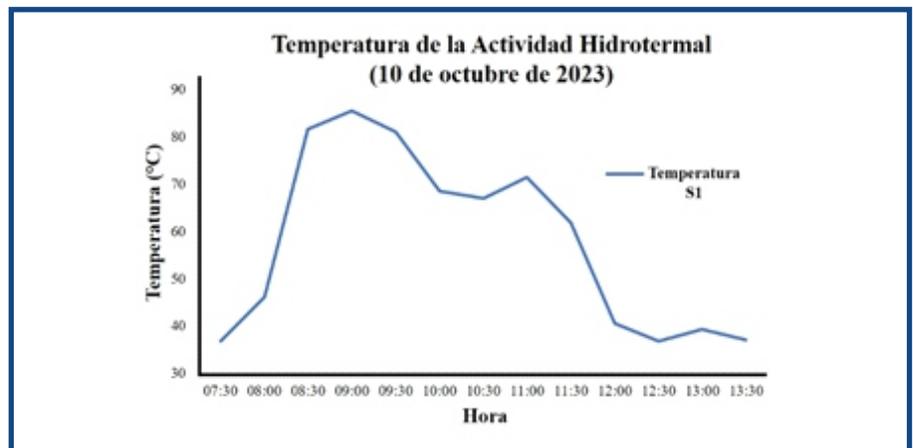


Figura 6. Registro de temperatura de la actividad hidrotermal en el sitio 1 (S1). Registro del 10 de octubre de 2023, de las 7:30 h a las 13:30 h.



Los datos obtenidos en el registro de prueba del 25 de noviembre 2023, muestran un comportamiento de temperatura similar a los sitios S2 y S3 de la segunda campaña. Durante este día, el registro de datos fue cada segundo, desde las 13:00:00 h hasta las 21:02:31 h. En este periodo se observaron hasta 22 episodios de actividad hidrotermal con temperaturas superiores a los 35°C (Figura 5), y donde la máxima registrada fue de 36.84°C, pero siguen siendo temperaturas menores a las registradas en el sitio S1. Esta variabilidad se podría atribuir a los patrones de circulación subsuperficial de este sitio, lo que llevaría a suponer que es un fenómeno que ocurre a nivel muy local de este sistema. Otros estudios sobre monitoreo de la temperatura en sistemas hidrotermales submarinos han reportado que los diferentes niveles de la marea afectan las descargas hidrotermales, influyendo en la temperatura de los fluidos descargados (Aliani et al., 1998; Fitzsimons, et al., 1997; Tsimplis & Vlahakis, 1994). Por ejemplo, en el SHSS de Milos, investigaron la relación entre las fluctuaciones de temperatura y las mareas mediante análisis espectral estándar y encontraron una relación inversa entre estos dos parámetros (Aliani et al., 1998). Sin embargo, otros factores impredecibles y desconocidos también pueden influir en los registros de temperatura (Hessler et al., 1988), lo que puede enmascarar la relación con las mareas y hacer que esta sea evidente solo bajo ciertas condiciones. Debido a lo anterior se consultó la página web Tabla de Mareas de Puerto Vallarta (Tabla de Mareas, 2025), para obtener de manera cualitativa el comportamiento de las mareas en la región de estudio. Aunque los datos no son exactamente del sitio de estudio, Puerto Vallarta está relativamente cerca y estos datos de marea pueden proporcionar información útil para interpretar la variabilidad en los registros de temperatura. La figura 7 muestra el comportamiento de la marea durante el periodo del 9 de septiembre al 31 de octubre de 2023.

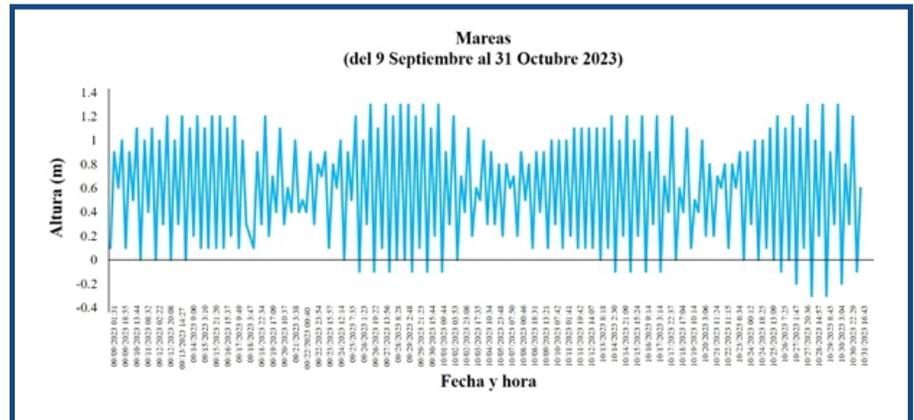


Figura 7. Registro de mareas en el periodo del 9 de septiembre al 31 de octubre de 2023. Datos tomados de la página web Tabla de Mareas de Puerto Vallarta (Tabla de Mareas, 2025).

Si se observa la variabilidad de la temperatura de las descargas hidrotermales de los tres sitios de estudio (figura 4) y el comportamiento de la marea (figura 7) se podría observar que las bajas temperaturas de los tres sitios, al final del periodo de estudio (después del 23 de octubre 2023), corresponden con los valores mayores en las mareas. Esta relación inversa puede deberse a fenómenos locales que requieren de mayor profundidad en su estudio para lograr el entendimiento de esta dinámica en el SHSSBB.

Las variaciones en la temperatura entre los sitios de estudio también podrían deberse a la naturaleza de la circulación del agua calentada geotérmicamente, es decir, como las DH que se presentan en estos sitios son de $< 100^{\circ}\text{C}$ y además son difusas, las temperaturas a partir de flujos hidrotermales difusos son muy variables debido a su origen (Barreyre et al., 2014; Scheirer et al., 2006; Sohn, 2007; Tivey et al., 2002;) y a múltiples factores, incluyendo cambios en la presión barométrica, la marea y la interacción entre el agua hidrotermal y el agua marina circundante. Lo anterior evidencia la necesidad de integrar en futuros estudios los registros de esos parámetros exactamente en los sitios de estudio, para así comprender mejor su papel en las fluctuaciones de temperatura de los SHSS.



El monitoreo de la temperatura en el SHSSBB representó un desafío debido a las condiciones del entorno marino, principalmente por la poca profundidad a la que se encuentra este sistema hidrotermal, ya que el fondo se encuentra sometido a la acción constante del oleaje, las tempestades y las corrientes de fondo (Canet et al., 2000), lo que provocó que se movieran del lugar de instalación las primeras anclas, las cubetas con concreto, lo que ocasionó que se perdieran algunas de éstas junto con los sensores que fueron instalados en la primera campaña de muestreo. Este aprendizaje evidenció la necesidad de mejoras en el diseño de las anclas, así que se realizaron ajustes para la campaña de 2023, donde se utilizaron placas de acero como anclas, las cuales ofrecieron mayor estabilidad y resistencia. Estas modificaciones fueron útiles para obtener registros de hasta 2,516 datos en cada sitio de estudio (S1, S2 y S3). Lo anterior resalta las complejidades inherentes en el monitoreo continuo en SHSS y revela la importancia de adaptar mejor las metodologías a las condiciones específicas de este tipo de ambientes. Se realizó el monitoreo de temperatura en el SHSSBB durante un periodo corto de 53 días, evidenciando una periodicidad en la actividad hidrotermal. En el sitio S1 se registraron temperaturas de hasta 85.56°C, mientras que en los otros dos sitios también se observó una periodicidad, solo que con temperaturas menores. Además, se implementaron mejoras en las estrategias de instalación de los sensores HOBO™ Pendant™ entre las dos campañas de muestreo, como lo fue el uso de placas de acero como anclas para los sensores durante la segunda campaña. Sin embargo, para obtener un panorama más completo de la variabilidad y periodicidad de la temperatura en la actividad hidrotermal de este sistema, se requiere un monitoreo más extenso que incluya otros parámetros como la presión barométrica, datos precisos de mareas, así como la identificación de los patrones de circulación del flujo hidrotermal debajo del lecho marino donde se localiza este sistema entre otros, lo que podría revelar posibles correlaciones y contribuir a una mejor caracterización de la dinámica hidrogeológica presente. Asimismo, se sugiere que sean monitoreos continuos y a largo plazo.



▶ AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Rosa María Chávez Dagostino y a Natalia Balzaretti Merino, por su invaluable colaboración y apoyo durante el trabajo de campo en ambas campañas de muestreo.

▶ LITERATURA CITADA

- Aliani, S., Amici, L., Dando, P.R., & Meloni, R. (1998).** Time series of water pressure and bottom temperature in a marine shallow water hydrothermal vent of Milos island (Aegean volcanic arc): Preliminary results. *Bulletin de la Commission internationale pour l'exploration scientifique de la Mer Méditerranée*, 35, 46-47.
- Aliani, S., Meloni, R., & Dando, P.R. (2004).** Periodicities in sediment temperature time-series at a marine shallow water hydrothermal vent in Milos Island (Aegean Volcanic arc, Eastern Mediterranean). *Journal of Marine Systems*, 46, 109-119. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2003.11.015>
- Arellano-Ramirez, Y., Kretzschmar, T.G., & Hernandez-Martinez, R. (2017).** Water-Rock-Microbial Interactions in the hydrothermal spring of Puertecitos, Baja California, Mexico. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17, 865-868. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2017.01.044>
- Barreyre, T., Escartín, J., Sohn, R.A., Cannat, M., Ballu, V., & Crawford, W.C. (2014).** Temporal variability and tidal modulation of hydrothermal exit-fluid temperatures at the Lucky Strike deep-sea vent field, Mid-Atlantic Ridge. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 119, 2543-2566. <https://doi.org/10.1002/2013JB010478>



- Canet, C., & Prol-Ledesma, R.M. (2006).** Mineralizing processes at shallow submarine hydrothermal vents: Examples from Mexico. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58 (1), 83-102. <https://doi.org/10.18268/bsgm2006v58n1a3>
- Canet, C., Prol-Ledesma, R.M., & Melgarejo, J.C. (2000).** El sistema hidrotermal de Punta Mita (México): Un ejemplo de depósito exhalativo submarino actual. *Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe Coruña*, 25, 325-327.
- Cardigos, F., Colaco, A., Dando, P.R., Ávila, S.P., Sarradin, P.M., Tempera, F., Conceicao, P., Pascoal, A., & Santos, R.S. (2005).** Shallow water hydrothermal vent field fluids and communities of the D. Joao de Castro Seamount (Azores). *Chemical Geology*, 224, 153-168. <https://doi:10.1016/j.chemgeo.2005.07.019>
- Carlino, S., Mirabile, M., Troise, C., Sacchi, M., Zeni, L., Minardo, A., Caccavale, M., Darányi, V., & De Natale, G. (2016).** Distributed-Temperature-Sensing Using Optical Methods: A First Application in the Offshore Area of Campi Flegrei Caldera (Southern Italy) for Volcano Monitoring. *Remote Sensing*, 8, 674. <https://doi.org/10.3390/rs8080674>
- Chevaldonné, P., Desbruyères, D., & Le Haitre, M. (1991).** Time-series of temperature from three deep-sea hydrothermal vent sites. *Deep Sea Research* 38 (11), 1417– 1430. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(91\)90014-7](https://doi.org/10.1016/0198-0149(91)90014-7)
- Corliss, J.B., Dymond, J., Gordon, L.I., Edmond, J.M., Von Herzen, R.P., Ballard, R.D., Green, K., Williams, D., Bainbridge, A., Crane, K., & Van Andel, T.H. (1979).** Submarine Thermal Springs on the Galápagos Rift. *Science*, 203(4385), 1073–1083.
- Couto, R.P., Rodrigues, A.S., & Neto, A.I. (2015).** Shallow-water hydrothermal vents in the Azores (Portugal). *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 15 (4), 495-505. <https://doi.org/10.5894/rgci584>



- Dando, P.R., Hughes, J.A., & Thiermann, F. (1995).** Preliminary observations on biological communities at shallow hydrothermal vents in the Aegean Sea. In: Parson, L.M., Walker, C.L., Dixon, D.R. (Eds.), *Hydrothermal Vents and Processes. Geological Society Special Publication, London*, pp. 303– 317. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.087.01.23>
- Ding, K., Seyfried Jr., W.E., Tivey, M.K., & Bradley, A.M. (2001).** In situ measurement of dissolved H₂ and H₂S in high-temperature hydrothermal vent fluids at the Main Endeavour Field, Juan de Fuca Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 186, 417-425. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(01\)00257-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(01)00257-6)
- Du, Z., Zhang, X., Xue, B., Luan, Z., & Yan, J. (2020).** The applications of the *in situ* laser spectroscopy to the deep-sea cold seep and hydrothermal vent system. *Solid Earth Sciences*, 5, 153-168. <https://doi.org/10.1016/j.sesci.2020.06.001>
- Fitzsimons, M.F., Dando, P.R., Hughes, J.A., Thiermann, F., Akoumianaki, I., & Pratt, S.M. (1997).** Submarine hydrothermal brine seeps off Milos. Greece: observations and geochemistry. *Marine chemistry*, 57, 325-340. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(97\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(97)00021-2)
- Fornari, D. J., Shank, T., Von Damm, K.L., Gregg, T.K.P., Lilley, M., Levai, G., Bray, A., Haymon, R.M., Perfit, M.R., & Lutz, R. (1998).** Time-series temperature measurements at high-temperature hydrothermal vents, East Pacific Rise 9°49'-51'N: evidence for monitoring a crustal cracking event. *Earth and Planetary Science Letters*, 160, 419–431. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00101-0](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00101-0)
- Foucher, J.P., Henry, P., Le Pichon, X., & Kobayashi, K. (1992).** Time variations of fluid expulsion velocities at the toe of the eastern Nankatai accretionary complex. *Earth and Planetary Science Letters*, 109, 373–382. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(92\)90099-H](https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90099-H)
- Fujiwara, Y., Tsukahara, J., Hashimoto, J., & Fujikura, K. (1998).** In situ spawning of a deep-sea vesicomid clam: evidence for an environmental clue. *Deep Sea Research I* (45), 1881– 1889.



- Goto, S., Kinoshita, M., Matsubayashi, O., & Von Herzen, R.P. (2002).** Geothermal constraints on the hydrological regime of the TAG active hydrothermal mound, inferred from long-term monitoring. *Earth and Planetary Science Letters*, 203, 149-163. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00876-2](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00876-2)
- Hessler, R.R., Smithey, W.M., Boudrias, M.A., Keller, C.H., Luts, R.A., & Childress, J.J. (1988).** Temporal changes in megafauna at the Rose Garden hydrothermal vent (Galapagos Rift: eastern tropical Pacific). *Deep-Sea Research*, 35, 1681-1709. [https://doi.org/10.1016/0198-0149\(88\)90044-1](https://doi.org/10.1016/0198-0149(88)90044-1)
- Kelley, D.S., Delaney, J.R., & Juniper, S.K. (2014).** Establishing a new era of submarine volcanic observatories: Cabling Axial Seamount and the Endeavour Segment of the Juan de Fuca Ridge. *Marine Geology*, 352, 426-450. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2014.03.010>
- Kinoshita, M., Matsubayashi, O., & Von Herzen, R.P. (1996).** Subbottom temperature anomalies detected by long-term temperature monitoring at the TAG hydrothermal mound. *Geophysical Research Letters*, 23, 3467-3470. <https://doi.org/10.1029/96GL02150>
- Langmuir, C., Humphris, S., Fornari, D., Van Dover, C., Von Damm, K., Tivey, M.K., Colodner, D., Charlou, J.L., Desonie, D., Wilson, C., Fouquet, Y., Klinkhammer, G., & Bougault, H. (1997).** Hydrothermal vents near a mantle hot spot: The Lucky Strike vent field at 37°N on the Mid-Atlantic Ridge. *Earth and Planetary Science Letters*, 148, 69-91. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(97\)00027-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(97)00027-7)
- Larson, B.I., Lilley, M.D., & Olson, E.J. (2009).** Parameters of subsurface brines and hydrothermal processes 12-15 months after the 1999 magmatic event at the Main Endeavor Field as inferred from in situ time series measurements of chloride and temperature. *Journal of Geophysical Research*, 114, B01207. <https://doi.org/10.1029/2008JB005627>



- Lee, R.W., Robert, K., Matabos, M., Bates, A.E., & Juniper, S.K. (2015).** Temporal and spatial variation in temperature experienced by macrofauna at Main Endeavour hydrothermal vent field. *Deep-Sea Research I*, 106, 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2015.10.004>
- Li, L.F., Zhang, X., Luan, Z.D., Du, Z.F., Xi, S.C., Wang, B., Lian, C., & Yan, J. (2018).** A new approach to measuring the temperature of fluids reaching 300°C and 2 mol/kg NaCl based on the Raman shift of water. *Applied Spectroscopy*, 72 (11), 1621-1631. <https://doi.org/10.1177/0003702818776662>
- Liao, G., Zhou, B., Liang, C., Zhou, H., Ding, T., Wang, Y., & Dong, C. (2016).** Moored observation of abyssal flow and temperature near a hydrothermal vent on the Southwest Indian Ridge. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121, 836-860. <https://doi.org/10.1002/2015JC011053>
- López-Sánchez, A., Bâncora-Alsina, C., Prol-Ledesma, R.M., & Hiriart, G. (2006).** A New Geothermal Resource in Los Cabos, Baja California Sur, Mexico. *In: Proceedings 28th: New Zealand, Geothermal Workshop*, S3-6.
- Marques-Mendes, A.R. (2008).** Influência Das fonts Hidrotermais Marinhas De Baixa Profundidade Na Composição Das Comunidades De Meiofauna. Tesis de Licenciatura en Biología Marina, Universidade Dos Açores, Ponta Delgada, Azores, Portugal, pp. 38.
- Melwani, A.R., & Kim, S.L. (2008).** Benthic infaunal distributions in shallow hydrothermal vent sediments. *Acta Geologica*, 33, 162-175. <https://doi.org/10.1016/j.actao.2007.10.008>
- Mittelstaedt, E., Escartín, J., Gracias, N., Olive, J.A., Barreyre, T., Davaille, A., Cannat, M., & Garcia, R. (2012).** Quantifying diffuse and discrete venting at the Tour Eiffel vent site, Lucky Strike hydrothermal field. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 13 (4), 1-18. <https://doi.org/10.1029/2011GC003991>



- Momma, H., Iwase, R., Mitsuzawa, K., Kaiho, Y., & Fujiwara, Y. (1998).** Preliminary results of a three-year continuous observation by a deep seafloor observatory in Sagami Bay, central Japan. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 108, 263–274. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(98\)00107-1](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(98)00107-1)
- Núñez-Cornú, F.J., Prol-Ledesma, R.M., Cupul-Magaña, A., & Suárez-Plascencia, C. (2000).** Near shore submarine hydrothermal activity in Bahía Banderas western Mexico. *Geofísica Internacional*, 39, 171-178.
- Prol-Ledesma, R. M., Canet, C., Torres-Vera, M.A., Forrest, M.J., & Armienta, M.A. (2004).** Vent fluid chemistry in Bahía Concepción coastal submarine hydrothermal system, Baja California Sur, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 137, 311-328. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2004.06.003>
- Prol-Ledesma, R.M., & Canet, C. (2014).** Evaluación y Explotación de los Recursos Geotérmicos del Océano. En Low-Pfeng, A. y Peters-Recagno, E.M. (Eds.), *La Frontera Final: El Océano Profundo*, pp. 11-30.
- Prol-Ledesma, R.M., Canet, C., Melgarejo, J.C., Tolson, G., Rubio-Ramos, M.A., Cruz-Ocampo, J.C., Ortega-Osorio, A., Torres-Vera, M.A., & Reyes, A. (2002).** Cinnabar deposition in submarine coastal hydrothermal vents, Pacific margin of central Mexico. *Economic Geology*, 97, 1331-1340. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.97.6.1331>
- Rinke, C., & Lee, R.W. (2009).** Macro camera temperature logger array for deep-sea hydrothermal vent and benthic studies. *Limnology and Oceanography: Methods*, 7, 527-534. <https://doi.org/10.4319/lom.2009.7.527>
- Rodríguez-Uribe, M., Jarquín-González, J., Salazar-Silva, P., Chávez-Dagostino, R., & Merino, N.B. (2024).** Cumaceans (Crustacea, Peracarida) associated with shallow-water hydrothermal vents at Banderas Bay, Mexico. *Biodiversity Data Journal*, 12, e139801. <https://doi.org/10.3897/BDJ.12.e139801>



- Rodríguez-Uribe, M.C., Núñez-Cornú, F.J., Prol-Ledesma, R.M., & Salazar-Silva, P. (2023).** Benthic infauna associated with a shallow-water hydrothermal system of Punta Mita (Mexico). *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 103, e26: 1–12. <https://doi.org/10.1017/S0025315423000164>
- Scheirer, D.S., Shank, T.M., & Fornari, D.J. (2006).** Temperature variations at diffuse and focused flow hydrothermal vent sites along the northern East Pacific Rise. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 7(3). <https://doi.org/10.1029/2005GC001094>
- Schultz, A., Dickson, P., & Elderfield, H. (1996).** Temporal variations in diffuse hydrothermal flow at TAG. *Geophysical Research Letters*, 23, 3471–3474. <https://doi.org/10.1029/96GL02081>
- Sohn, R.A. (2007).** Stochastic analysis of exit fluid temperature records from the active TAG hydrothermal mound (Mid-Atlantic Ridge, 26°N): 1. Modes of variability and implications for subsurface flow. *Journal of Geophysical Research*, 112, B07101. <https://doi.org/10.1029/2006JB004435>
- Stüben, D., Sedwick, P., & Colantoni, P. (1996).** Geochemistry of submarine warm springs in the limestone cavern of Grotta Azzurra, Capo Palinuro, Italy: evidence of mixing zone dolomitization. *Chemical Geology*, 131, 113–125. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(96\)00029-0](https://doi.org/10.1016/0009-2541(96)00029-0)
- Tabla de Mareas. (2025).** Tabla de mareas de Puerto Vallarta. Recuperado el 24 de enero de 2025 de <https://tablademareas.com/mx/jalisco/puerto-vallarta>
- Tarasov, V.G., Gebruk, A.V., Mironov, A.N., & Moskalev, L.I. (2005).** Deep-sea and shallow-water hydrothermal vent communities: Two different phenomena? *Chemical Geology*, 224(1-3), 5-39. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.07.021>
- Tivey, M.K., Bradley, A.M., Joyce, T.M., & Kadko, D. (2002).** Insights into tide-related variability at seafloor hydrothermal vents from timeseries temperature measurements. *Earth and Planetary Science Letters*, 202, 693–707. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)00801-4](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)00801-4)



- Tsirnplis, M.N., & Vlahakis, G.N. (1994).** Meteorological forcing and sea level variability in the Aegean Sea. *Journal of Geophysical Research*, 99 (C5), 9879 - 9890. <https://doi.org/10.1029/94JC00479>
- Vidal, V.M.V., Vidal, F.V., & Isaacs, J.D. (1978).** Coastal Submarine Hydrothermal Activity off Northern Baja California. *Journal of Geophysical Research*, 83, 1757 - 1774. <https://doi.org/10.1029/JB083iB04p01757>
- Wenzhöfer, F., Holby, O., Glud, R.N., Nielsen, H.K., & Gundersen, J.K. (2000).** In situ microsensor studies of a shallow water hydrothermal vent at Milos, Greece. *Marine Chemistry*, 69, 43-54. [https://doi.org/10.1016/S0304-4203\(99\)00091-2](https://doi.org/10.1016/S0304-4203(99)00091-2)



Artículo Científico

Estudio de las gónadas del pez pajarito *Hyporhamphus naos* (Hemirhamphidae) parasitadas con *Philometra* sp. (Nematoda: Philometridae) en Mazatlán, Sinaloa

Study of the gonads of the Pacific silverstripe halfbeak (*Hyporhamphus naos*) on the coast of Mazatlán, Sinaloa



1. Sandra Lizeth Pérez Vallejo

id 0009-0009-7790-0748

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad
Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa

2. Selene María Abad Rosales

id 0000-0002-3836-7479

Centro de Investigación en Alimentación y
Desarrollo, C.P., Mazatlán, Sinaloa México.

3. Nurenskaya Vélez-Arellano

id 0000-0003-2429-2573

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad
Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa

4. Diana Judith López-Peraza

id 0000-0002-7344-4134

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad
Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa

5. Mayra I. Grano-Maldonado

id 0000-0001-7519-379X

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad
Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa
Autor de correspondencia: granomayra@uas.edu.mx

latindex



CREATIVE COMMONS

OPEN ACCESS

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el original.



**Estudio de las gónadas del pez pajarito *Hyporhamphus naos*
(Hemirhamphidae) parasitadas con *Philometra* sp.
(Nematoda: Philometridae) en Mazatlán, Sinaloa**

**Study of the gonads of the Pacific
silverstripe halfbeak (*Hyporhamphus naos*)
on the coast of Mazatlán, Sinaloa**

▶ RESUMEN

El objetivo de este estudio fue elaborar el primer reporte del parásito *Philometra* sp. (Nematoda: Philometridae) en la gónada masculina del pez *Hyporhamphus naos* Banfort y Collete (2001) de la familia Hemiramphidae en el Pacífico Mexicano. La obtención de los organismos se realizó en el embarcadero de la Isla de la Piedra y en Playa Norte en Mazatlán, Sinaloa. Los peces se llevaron al laboratorio donde se extrajeron las gónadas parasitadas y se tomó una sección de tejido gonádico de hembras y machos parasitados con este nemátodo, la cual fue examinada con técnicas histológicas. Los resultados mostraron que las gónadas no presentaban daños tisulares ni respuesta inmune aparente en las gónadas en ambos sexos. Sin embargo, se observa 26% de células eosinófilas presentes en el tejido gonádico de las hembras. Se sugiere realizar muestreos sistemáticos interanuales en otras épocas de arribo de pajaritos en la bahía de Mazatlán para evaluar cambios en el parasitismo de *Philometra* sp. Sobre las gónadas de *Hyporhamphus naos*.

Palabras clave: Reproducción, helminto, histología, Pacífico tropical



▶ ABSTRACT

The objective of this study was to report for the first time the presence of the parasite *Philometra* sp. (Nematoda: Philometridae) in the male gonad of the silverstripe fish *Hyphorhamphus naos* Banfort and Collete (2001) of the Hemiramphidae family in the Mexican Pacific. The organisms were obtained at the Isla de la Piedra and Playa Norte in Mazatlán, Sinaloa. The fish were taken to the laboratory where the parasitized gonads were removed and a section of gonad tissue was taken from females and males parasitized with this nematode, which was examined with histological techniques. The results showed that the gonads did not present tissue damage, nor any apparent immune response in the gonads in both sexes. However, 26% of eosinophilic cells are present in the ovary tissue. It is suggested that systematic interannual sampling should be carried out at other arrival times of this fish at the Bay of Mazatlán, to evaluate changes in the parasitism of *Philometra* sp, on the gonads of *Hyphorhamphus naos*.

Keywords: Reproduction, helminth, histology, Tropical Pacific

▶ INTRODUCCIÓN

En Mazatlán (Sinaloa, México) la especie del pez pajarito *Hyphoramphus naos* es de importancia comercial y cultural (Grano-Maldonado & Mendieta-Vega, 2020), estos organismos arriban a las aguas de la bahía Mazatlán a mitad de primavera y en un lapso corto de tiempo (15-20 días) se reproducen (Salcido, Morán, & Arellano, 2011). Los “pajaritos” son peces que se caracterizan por vivir en la superficie de los mares tropicales y subtropicales de la zona del Pacífico (Banford & Collete, 2001). Los pajaritos son producto de alto consumo en esta zona y el estudio de sus afectaciones reproductivas es un indicador de la salud de la población ya que esta especie arriba a las aguas de la bahía Mazatlán con el único fin de reproducirse (Rivera-Toscano, Rodríguez Montes de Oca, Román-Reyes, López Peraza, & Grano Maldonado, 2022). Estos últimos autores reportaron la presencia de nemátodos miembros de la familia Philometridae en Mazatlán y Teacapán. Estos

parásitos representan el grupo más importante de nematodos dracunculoides que parasitan a los peces (Moravec, 2006). A pesar de la importancia cultural, alimentaria y económica de los “pajaritos” en la costa de Sinaloa se desconoce mucha de su información biológica. En este contexto, la presente investigación pretende identificar el daño causado por los nematodos del género *Philometra* en las gónadas de hembras y machos de *H. naos* que puedan afectar su reproducción.

▶ MATERIALES Y MÉTODOS

En un lapso de un mes se colectaron 43 peces “pajarito” *Hyphorhamphus naos*, estos se compraron directamente con los pescadores de dos diferentes puntos de las costas de Mazatlán, Sinaloa: Playa Norte y el embarcadero de la Isla de la Piedra. Las cuales fueron llevadas en hieleras al laboratorio CA-UAS-162 ubicado en la Facultad de Ciencias del Mar. Posteriormente, se realizaron las mediciones biométricas y se realizó una disección de los órganos internos en diferentes cajas Petri con ayuda de pinzas y tijeras. Las gónadas fueron separadas en ovarios y testículos. Las gónadas parasitadas fueron separadas de acuerdo a las observaciones previamente registradas por (Rivera-Toscano, et. al. 2022; Grano-Maldonado, Andrade Gómez, Mendoza Garfias, Solórzano García, García Pantoja, Nieves Soto, Pérez Ponce de León, 2024).



Figura 1. Pez “pajarito” (*Hyphorhamphus naos*), capturado en las costas de Mazatlán (Sinaloa, México).

Estas gónadas fueron fijadas en formalina neutralizada al 10% para su preservación y el estudio histológico correspondiente que fue realizado en las instalaciones del Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo (CIAD subsección Mazatlán). Los parámetros ecológicos se llevaron a cabo de acuerdo a Bush et al. (1997).

Histología

El proceso histológico aplicado a las secciones de gónada fijadas previamente se llevó a cabo de acuerdo con la técnica descrita en Luna (1968). Los cortes a 5 micras se tiñeron con Hematoxilina-Eosina-Floxina (Bell and Lightner, 1988). Las secciones teñidas se revisaron al microscopio óptico (Olympus CX31) para su diagnóstico microanatómico. Para calcular el porcentaje de células eosinófilas en el tejido gonádico, se utilizó el programa Sigma Scan Pro Versión 5, con el cual se estimó el área cubierta por células eosinófilas utilizando ocho secciones de la gónada parasitada. El área cubierta por células eosinófilas se dividió entre el área total del tejido y se multiplicó por cien.

▶ RESULTADOS

De las 43 gónadas analizadas, se identificaron 19 gónadas parasitadas con *Philometra* sp., 10 gónadas masculinas (testículo) y nueve femeninas (ovario). Los parámetros ecológicos mostraron una prevalencia del 44%, abundancia de 1.06, intensidad promedio de 2.4 e intervalo de intensidad de 1-5 (Tabla 1). El nemátodo se reconoce por su coloración rojo oscuro dentro de la gónada (Fig. 2) la cual se muestra un lóbulo de menor tamaño (atrofiada de crecimiento). La gónada masculina se identificó en estadio gonádico con espermatozoides maduros principalmente, aunque con espermátidas aún presentes cercanas a la periferia del túbulo seminífero (Fig. 3). En el testículo, el nemátodo se localizó entre los túbulos seminíferos, y entre las lamelas ovígeras de la gónada femenina. En el testículo parasitado se muestra la zona que limita la cutícula del parásito, aunque no se observó respuesta del sistema inmune ni daño histológico evidente en el tejido gonádico. La gónada femenina presentó signos de desove, con numerosos folículos postovulatorios y ovocitos maduros (ovocitos en etapa 3, 4 y 5) y algunos en etapas inmaduras (ovocitos etapa 1, 2) (Fig. 4). En la zona de localización del parásito *Philometra* sp., en esta gónada, no se muestra un daño histopatológico aparente, igual que en el macho, no se identificó evidencia de daños tisulares ni respuesta inmune evidente. Sin embargo se observó un 26% de células eosinófilas presentes en el tejido gonádico de las hembras.



Tabla 1. Presencia de parásitos *Philometra* sp. en gónadas de pajarito *H. naos* en cuatro semanas de muestreo (mayo-junio).

Fecha	Sexo	# parásitos en gónada
Semana 1		
16/05/2024	M	1
Semana 2		
28/05/2024	M	4
	M	4
Semana 3		
04/06/2024	M	1
	M	1
05/06/2024	M	2
	H	2
10/06/2024	H	4
	H	1
	M	2
Semana 4		
12/06/2024	H	2
	M	5
	M	4
	H	2
	H	2
	H	3
	H	1
	M	2
H	3	

M=macho, H=hembra

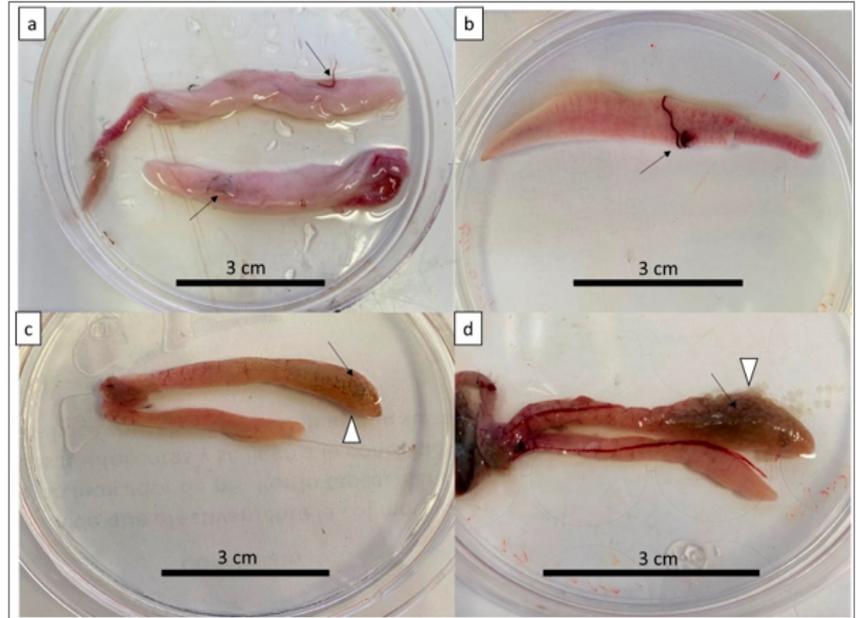


Figura 2. Gónadas del pez pajarito *Hyphoramphus naos* parasitadas por el nematodo *Philometra* sp. (flecha) colectados en Mazatlán (Sinaloa, México). a y b) Testículo, c y d) Ovarios. Se observa una malformación en tamaño en la gónada parasitada (flecha blanca).

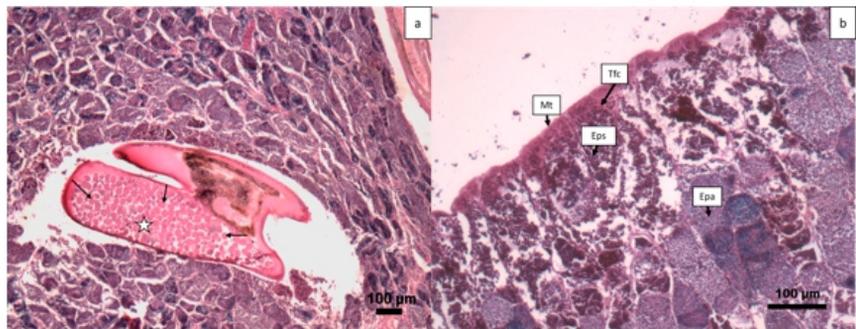


Figura 3. Imágenes del tejido gonádico del pez pajarito *Hyphoramphus naos* colectados en Mazatlán (Sinaloa, México). a) Gónada de macho (testículo) parasitada por una hembra de *Philometra* sp. (estrella) donde se evidencian los ovocitos del nemátodo (flecha). b) Mesotelio (Mt), tejido fibroso conectivo (Tfc), Espermatocono secundario (Eps), Espermátidas (Epa).

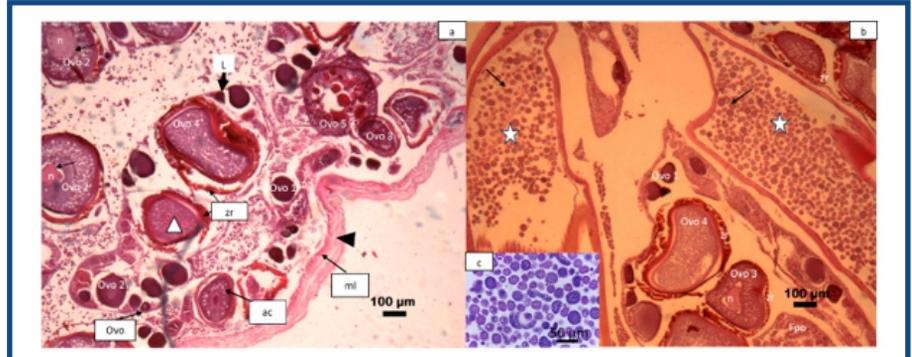


Figura 4. Imágenes de tejido gonádico del pez pajarito *Hyphorampus naos* colectados en Mazatlán (Sinaloa, México). Gónada femenina. a) Músculo (ml), anillo circumnuclear (ac), zona radiata: zona de pequeñas células que rodean al ovocito para ayudar con su desarrollo (zr), Lámina ovígera (L), nucleolos (nl), núcleo (n), tejido conectivo denso no modelado (flecha negra), ovocito en vitelogénesis temprana (flecha blanca), ovocito cromatina nucleolar (ovo): núcleo grande y nucleolo concéntrico poco citoplasma, ovocito tipo 1: muestra un núcleo grande con una pequeña parte de citoplasma, perinucleares (ovo 1), ovocito tipo dos: el citoplasma se muestra más grande y se observa la presencia de nucleolos al interior del núcleo, alvéolo cortical (ovo 2), ovocito tipo 3: se presentan gránulos de vitelo en el citoplasma y su debido núcleo con nucleolos (ovo 4), ovocito tipo 5: presenta gránulos mayores con núcleo migratorio (ovo 5). b) Gónada de hembra (ovario) parasitada por una hembra de *Philometra* sp. (estrella) donde se evidencia sus ovocitos (flecha), folículo post ovulatorio (Fpo). c) ovocitos de *Philometra* sp. (40x).

DISCUSIÓN

La bahía de Mazatlán es un área que ha atraído la atención de parasitólogos para estudiar la fauna de metazoarios parásitos de peces marinos (Grano-Maldonado & Pérez Ponce de León, 2023) como los helmintos. Los nemátodos son un grupo muy diverso de parásitos que cuentan con un impacto importante en la parasitación de vertebrados ya que se alojan prácticamente en cualquier órgano, aunque podemos encontrar la mayoría en el tubo digestivo y gónadas (García-Prieto, Osorio Sarabia, & Lamothe-Argumedo, 2014). Sin embargo, es un grupo poco estudiado en México. Hasta ahora se han reportado seis estudios de nemátodos de la familia Philometridae en México: *Philometra salgadoi* Vidal-Martínez, Aguirre-Mecedo, Moravec, 1995 en la cavidad ocular del pez *Epinephelus morio* (Serranidae) en Yucatán (Vidal, Aguirre, & Moravec, (1995); *Philometra margolisi* Moravec, Vidal-Martínez, Aguirre-Macedo, 1995 en gónadas de *Epinephelus morio* (Serranidae)



en Yucatán (Moravec, Vidal, & Aguirre, 1995); *Philometra ophisterni* Moravec, Salgado-Maldonado, Aguilar-Aguilar, 2002 en el mesenterio de *Ophisternon aenigmaticum* (Synbranchidae) en Veracruz (Moravec, Salgado, & Aguilar, 2002); *Philometra mexicana* Moravec y Salgado-Maldonado, 2007 en gónadas de *Epinephelus adscensionis* (Serranidae) en Veracruz (Moravec & Salgado, 2007); *Philometra poblana* Caspeta-Mandujano, Granados-Ramírez, Peralta-Rodríguez, 2009 en la piel en la base de las aletas pectorales del pez *Cichlasoma istlanum* (Cichlidae) en Puebla (Caspeta, Ramírez, & Peralta, 2009); *Philometra* sp. Costa, 1845 en gónadas de *Hyporhamphus naos* (Hemiramphidae) en Sinaloa (Rivera-Toscano et al., 2022; Grano-Maldonado et al., 2024).

El nematodo encontrado en las gónadas masculinas y femeninas fue identificado como *Philometra* sp. Este nematodo había sido previamente identificado en *H. naos*, organismos capturados en agua marina costera de Sinaloa, desde Teacapán hasta Mazatlán (Rivera-Toscano et al., 2022; Grano-Maldonado et al., 2024). Sin embargo, no se había elaborado un trabajo histológico que demostrara un posible daño en el tejido gonádico en esta especie de pez. En el trabajo realizado por Bakenhaster, Lowerre-Barbieri, Kiryu, Walters, & Fajer-Avila. (2014) con curvina ocelada *Sciaenops ocellatus*, identificaron daños histológicos provocados por *Philometra floridensis* en tejido como respuesta inflamatoria por la presencia de leucocitos, inflamación granulomatosa y células gigantes multinucleadas. Los peces infestados mantuvieron una alta fecundidad y los mejores puntajes en cuanto al índice de salud, con una fecundidad relativa más alta comparada con los peces no infectados, de acuerdo a lo mencionado por estos autores. Sin embargo, en el presente estudio no se identificaron daños histológicos evidentes en las gónadas en ambos sexos, como se muestran en las Figuras 3 y 4, únicamente se observa la presencia de células eosinófilas como respuesta del sistema inmune que suele estar presentes después del desove del ovario. Al respecto, Steinel & Bolnick (2017), McBride & Thurman (2003) describen la presencia de melanomacrófagos que juegan un rol importante en el sistema inmune en peces como la agujeta brasileña *Hemiramphus brasiliensis*. Por otro lado, este tipo de células eosinófilas no habían sido reportadas anteriormente para *Hyphoramphus* spp. en esta misma zona del Pacífico



Mexicano (Salcido et al., 2011). En el presente trabajo, las células eosinófilas se observan aisladas y en un porcentaje bajo (25%), respecto al tejido cercano al parásito, si bien con esta información no es posible sugerir que estas células eosinófilas sean una respuesta al sistema inmune, si es un antecedente para futuros trabajos.

En cuanto a la morfología y anatomía de la gónada, McBride y Thurman (2003) mencionan que las gónadas de las especies de “pajarito” están compuestas de dos lóbulos cilíndricos del mismo tamaño y forma. Sin embargo, en este estudio las gónadas muestran una alteración (atrofia de crecimiento) (ver Fig. 2 cd) provocada probablemente por la presencia del parásito. La reproducción de estos peces en la bahía de Mazatlán, se ha documentado en el 2002 con un alto porcentaje de hembras que desovan en el mes de mayo (90.48%) y no reporta la presencia de parásitos, ni la presencia de células eosinófilas (Salcido et al., 2011). Debido a que no hay mucha información disponible relacionada con las especies de Philometridos parasitando especies marinas (Moravec & Buron, 2013), otros autores como Innal et al. (2020) describieron daño en la cápsula fibrosa de las gónadas del pez cabrilla *Serranus cabrilla* (Serranidae) con evidente hiperemia causando una reacción inflamatoria. Radhakrishnan et al. (2009) reportaron a *Philometra cephalus* en testículos de *Valamugil cunnesius* (Mugilidae) en la India. Los autores, Deepthi, Sreekala, Sunil, Radhakrishnan, & Radhakrishnan, (2007) evidenciaron que la infección de *P. cephalus* generó una respuesta a nivel molecular generando estrés en ovarios infectados, pero no en testículos del mismo hospedero *V. cunnesius*. Estos autores consensuaron que los machos de *V. cunnesius* toleran más la infección que las hembras. Moravec (2006) menciona que los Philometridos son hematófagos, por ello su coloración rojo oscuro o café. En este contexto, en la presente investigación de “pajarito” se requieren más estudios histológicos comparativos para determinar daños específicos. El presente trabajo reporta por primera vez al nemátodo *Philometra* sp. parasitando testículos de peces de la familia Hemiramphidae en el Pacífico Mexicano. Las evidencias histológicas no indican daños significativos al tejido gonádico, lo que sugiere que no



se afectan los procesos reproductivos de la especie. Sin embargo, se requieren realizar estudios de histoquímica-inmunología más especializados. Se recomienda elaborar más estudios durante toda la temporada de arribo de estos peces (1-3 meses) para poder determinar las características de los posibles efectos causados por estos parásitos en el tejido gonadal y esto afecte a la reproducción de la especie.

► AGRADECIMIENTOS

A los compañeros de servicio social, América Elizabeth Hernández Flores, Daniela Alejandra Maciel Ibarra, Jaqueline Muñoz Lizárraga, Edén Rodríguez Vázquez que apoyaron para la colecta y disección de organismos. A los pescadores de la Isla de la Piedra y Playa Norte por su amable colaboración en obtener los peces para este estudio.

► LITERATURA CITADA

- Bakenhaster, M. D., Lowerre-Barbieri, S., Kiryu, Y., Walters, S., & Fajer-Avila, E. J. (2014).** *Philometra floridensis* (Nematoda: Philometridae) damages ovarian tissue without reducing host (*Sciaenops ocellatus*) fecundity. *Diseases of Aquatic Organisms*, 108(3), 227-239. <https://doi.org/10.3354/dao02695>
- Banford, H. M. y Collette, B. B. (2001).** A new species of halfbeak, *Hyporhamphus naos* (Beloniformes: Hemiramphidae), from the tropical eastern Pacific. *Revista de Biología Tropical*, 1, 45-46.
- Bell, T. A., & Lightner, D. V. (1988).** *A Handbook of Normal Penaeid Shrimp Histology*. Allen Press, Kansas, 114 pp.
- Bush, A. O.; Lafferty, K. D.; Lotz, J. M. & Shostak, W. 1997.** Parasitology meets ecology on its own terms: Margolis et al. revisited. *Journal for Parasitology*, 83: 575–583.
- Caspeta, J. M., Ramírez, J. G., & Peralta, J. L. (2009).** A new philometrid species (Nematoda) from the freshwater fish *Cichlasoma istlanum* (Jordan and Snyder, 1899) (Cichlidae) in Mexico. *Journal of Parasitology*, 95(2), 403-406. <https://doi.org/10.1645/GE-1768.1>



- Deepthi, G. R., Sreekala, L. K., Sunil, M. S., Radhakrishnan, T., & Radhakrishnan, S. (2007).** Molecular stress response of the long-arm mullet, *Valamugil cunnesius* (Val.), to *Philometra cephalus* (Nematoda) infection. *Indian Journal of Multidisciplinary Research*, 3, 327-334.
- García Prieto, L., Osorio Sarabia, D., & Lamothe-Argumedo, M. R. (2014).** Biodiversidad de Nematoda parásitos de vertebrados en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 171-176. <https://doi.org/10.7550/rmb.31746>
- Grano Maldonado, M. I., & Mendieta, R. A. (2020).** Parasitosis, turismo gastronómico e identidades alimentarias: un problema de salud pública en Mazatlán, Sinaloa, México. *Neotropical Helminthology*, 13(2), 203-225. <https://doi.org/10.24039/rh2019132641>
- Grano Maldonado, M. I., & Pérez Ponce de León, G. (2023).** Patrones de diversidad de la fauna de metazoarios parásitos de peces marinos en la Bahía de Mazatlán, Sinaloa. *Revista Ciencias del Mar UAS*, 1(1), 59-85.
- Grano Maldonado, M. I., Andrade Gómez, L. Mendoza Garfias, B., Solórzano García, B., García Pantoja, A. Nieves Soto, M. Pérez Ponce de León, G. (2024).** Metazoan Parasites of the Pacific Silverstripe Halfbeak, *Hyporhamphus naos* (Osteichthyes: Hemiramphidae) in Mazatlán Bay, Mexico. *Pacific Science*, 77(4): 441-45. <https://doi.org/10.2984/77.4.6>
- Innal, D., Stavrescu-Bedivan, M., & Ozmen, O. (2020).** Parasite infection in *Serranus cabrilla* (Perciformes, Serranidae): histopathological aspects and new host record for nematode genus *Philometra* from Aegean Sea, Turkey. *Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society*, 70(4), 1817-1822. <https://doi.org/10.12681/jhvms.22227>
- Luna, L. (1968).** Manual of histologic staining methods of the Armed Forces Institute of Pathology. *McGraw-Hill Book Company, New York.*



- McBride, R., & Thurman, P. E. (2003).** Reproductive Biology of *Hemiramphus brasiliensis* and *H. balao* (Hemiramphidae): Maturation, Spawning Frequency, and Fecundity. *Biological Bulletin*, 204(1), 57-67. <https://doi.org/10.2307/1543496>
- Moravec, F. (2006).** Dracunculoid and Anguillicoloid Nematodes Parasitic in Vertebrates. *Helminthologia*, 44(3), 150-150. <https://doi.org/10.2478/s11687-007-0023-7>
- Moravec, F., & Buron, I. (2013).** A synthesis of our current knowledge of philometrid nematodes, a group of increasingly important fish parasites. *Folia Parasitologica*, 60, 81-101.
- Moravec, F., Salgado, G., & Aguilar, R. (2002).** Two new nematodes, *Paraseuratoides ophisterni* gen. et sp. n. (Quimperidae) and *Philometra ophisterni* sp. n. (Philometridae), from the swamp-eel *Ophisternon aenigmaticum* in Mexico. *Folia Parasitologica*, 49(2), 109-117.
- Moravec, F., & Salgado, G. (2007).** A new species of *Philometra* (Nematoda, Philometridae) from the gonads of the rock hind *Epinephelus adscensionis* (Osteichthyes) from the southern Gulf of Mexico. *Acta Parasitologica*, 52(4), 376-381.
- Moravec, F., Vidal, V. M., & Aguirre, L. (1995).** *Philometra margolisi* n. sp. (Nematoda: Philometridae) from the gonads of the red grouper, *Epinephelus morio* (Pisces: Serranidae), in Mexico. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 52, 161-165.
- Radhakrishnan S., Beevi A.M., Deepthi G.R., & Radhakrishnan T. (2009).** *Philometra cephalus* (Nematoda) infection of the gonads of the long-arm mullet, *Valamugil cunnesius* - histopathology. [Indiana Journal of Multidisciplinary Research](https://doi.org/10.24039/rnh20221611429), 5: 93-102
- Rivera Toscano, D., Rodríguez Montes de Oca, G. A., Román-Reyes, C., López Peraza, D. J., & Grano Maldonado, M. I. (2022).** Nuevo registro de especies de *Philometra* Costa, 1845 (Nematoda: Philometridae) que infectan la gónada de *Hyporhamphus naos* Banford & Collette, 2001 (Hemiramphidae: Beloniformes) en Sinaloa, México. *Neotropical Helminthology*, 16(1), 57-65. <https://doi.org/10.24039/rnh20221611429>



- Salcido, L., Morán, R., & Arellano, M. (2011).** Desoves del pajarito en la costa de Mazatlán: Aspectos reproductivos de *Hyporhamphus unifasciatus*, un recurso pesquero tradicional en Sinaloa. *Foro Científico de pesca ribereña*. Colima, México. pp15-16
- Steinel, N. C., & Bolnick, D. I. (2017).** Melanomacrophage Centers as a Histological Indicator of Immune Function in Fish and other Poikilotherms. *Frontiers in Immunology*, 8, 827. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2017.00827>
- Vidal, V. M., Aguirre, M. L., & Moravec, F. (1995).** *Philometra* (Ranjhinema) *salgadoi* n. sp. (Nematoda: Philometridae) from the Ocular Cavity of the Red Grouper *Epinephelus morio* (Pisces: Serranidae) from the Yucatan Peninsula, Mexico. *The Journal of Parasitology*, 81(5), 763-766. <https://doi.org/10.2307/3283970>



Revista CIMAR UAS

REVISTA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR

ISSN (en trámite)



latindex



CREATIVE COMMONS



OPEN ACCESS

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el origina



Artículo Científico

Huracán Wilma (2005): Análisis del impacto oceanográfico

Hurricane Wilma (2005): Analysis of the Oceanographic Impact



1. Luz de Lourdes Aurora Coronado Álvarez



0000-0001-5572-3247

Instituto de Investigaciones Oceanológicas,
Universidad Autónoma de Baja California,
Transpeninsular Tijuana-Ensenada, No. 3917,
Fraccionamiento Playitas, 22860 Ensenada,
Baja California, México.



2. Gabriela Y. Cervantes Díaz



0000-0003-3910-6876

Instituto de Investigaciones Oceanológicas,
Universidad Autónoma de Baja California,
Transpeninsular Tijuana-Ensenada, No. 3917,
Fraccionamiento Playitas, 22860 Ensenada,
Baja California, México.

Autor de correspondencia: cervantes.gabriela@uabc.edu.mx



Huracán Wilma (2005): Análisis del impacto oceanográfico

Hurricane Wilma (2005): Analysis of the Oceanographic Impact

▶ RESUMEN

El huracán Wilma tuvo un impacto en el sistema oceanográfico del Caribe mexicano que provocó cambios en la temperatura superficial del mar (TSM), la salinidad superficial del mar (SSM) y la clorofila-a (Chl-a). Para evaluar dichos cambios se usaron datos satelitales y análisis bayesiano en el periodo estacionario del huracán 21 - 23 de octubre de 2005, cuando se registraron vientos de alta intensidad $\sim 240 \text{ km h}^{-1}$. Se observó descenso en la TSM y la SSM producto de la mezcla vertical en combinación con las lluvias torrenciales ($\sim 1575 \text{ mm}$). La Chl-a, como proxy de la biomasa fitoplanctónica, presentó un incremento con desfase de 1 a 2 días respecto al paso del huracán debido al enriquecimiento de nutrientes. El análisis bayesiano permitió asociar probabilísticamente los cambios observados en TSM, SSM y Chl-a en el periodo de impacto de Wilma en la porción noreste del estado de Quintana Roo. Estos hallazgos subrayan la sensibilidad a los cambios del sistema oceánico del Caribe mexicano ante huracanes. Este estudio ofrece un marco robusto para comprender la respuesta oceanográfica a estos eventos y herramientas para analizar sus impactos ante fenómenos meteorológicos.

Palabras clave: Anomalía, viento, procesos oceanográficos, sistema ciclónico, Quintana Roo.



► ABSTRACT

Hurricane Wilma had an impact on the oceanographic system of the Mexican Caribbean, causing changes in sea surface temperature (SST), sea surface salinity (SSS), and chlorophyll-a (Chl-a). Satellite data and Bayesian analysis were used to evaluate these changes during the stationary period of the hurricane (October 21 - 23, 2005), when high winds ~ 240 km h⁻¹ were recorded. A decrease in SST and SSS was observed due to vertical mixing in combination with torrential rainfall (~ 1575 mm). Chl-a, as a proxy of phytoplanktonic biomass, showed an increase with a lag of 1 to 2 days concerning the passage of the hurricane due to nutrient enrichment. Bayesian analysis allowed us to probabilistically associate the observed changes in SST, SSM, and Chl-a during Wilma's impact in the northeastern portion of Quintana Roo state. These findings highlight the sensitivity of the Mexican Caribbean Ocean system to hurricane changes. This study provides a robust framework for understanding oceanographic responses to such events and offers tools to analyze their impacts under extreme meteorological phenomena.

Keywords: anomaly, wind, oceanography processes, cyclonic systems, Quintana Roo.

► INTRODUCCIÓN

Los huracanes son eventos climáticos extremos que generan cambios drásticos y rápidos en los sistemas oceánicos que afectan las condiciones físicas del agua en conjunto con la dinámica costera. Estos fenómenos ocasionan variaciones significativas en la temperatura superficial del mar (TSM), la salinidad superficial del mar (SSM) y la actividad biológica. Dentro de las variables proxy que son factibles para su uso está la clorofila satelital (Chl-a) entre otras. Los huracanes tienen la capacidad de alterar la estratificación de la columna de agua al mezclar capas más profundas con aguas superficiales, lo que impacta de forma inmediata los ecosistemas marinos y deja un efecto residual durante días en los cambios termohalinos, químicos y biológicos. En los últimos años



se ha generado un creciente interés por estudiar el impacto del cambio climático en la intensidad y frecuencia de los huracanes en la cuenca del Atlántico. Aunque algunos estudios, como el de Sánchez-Rivera, Frausto-Martínez, Gómez-Mendoza, Terán-Cuevas, Morales-Hernández (2021), no encontraron una tendencia significativa en el número de ciclones en esta región, si identificaron un ligero aumento en la intensidad de huracanes de categorías 4 y 5 en las últimas dos décadas. Esto coincide con las proyecciones de otros trabajos que sugieren que el cambio climático podría estar intensificando los huracanes más extremos (Knutson, Camargo, Chan, Emanuel, Ho, Kossin, Wu, 2019). Estas observaciones resaltan la importancia de realizar análisis detallados que permitan comprender mejor los impactos de estos eventos extremos en regiones vulnerables como el Caribe mexicano (Knutson et al., 2019).

El huracán Wilma, impactó la península de Yucatán en octubre de 2005, éste se caracterizó como uno de los eventos más intensos y duraderos registrados en el Atlántico. Con vientos máximos sostenidos que alcanzaron los 295 km h^{-1} y su permanencia prolongada sobre el Caribe mexicano durante más de ~ 50 horas. El huracán, alcanzó la categoría 5 en la escala Saffir-Simpson, convirtiéndose en un caso emblemático para estudiar los impactos de huracanes extremos en zonas costeras vulnerables (Beven, Brown, Franklin, Knabb, Pasch, Stewart, 2008). Las respuestas oceanográficas observadas tras este evento, como el enfriamiento significativo de la superficie del mar y la redistribución de propiedades físico-químicas, subrayan su capacidad de modificar la dinámica oceánica y los ecosistemas marinos asociados.

Comprender los mecanismos mediante los cuales los huracanes alteran la estructura termohalina y las dinámicas oceanográficas es fundamental, esto para prever sus consecuencias ecológicas y socioeconómicas. Uno de los efectos más notables de Wilma fue el enfriamiento de la capa superficial, resultado de la mezcla vertical inducida por los fuertes vientos y la intrusión de aguas subsuperficiales más frías hacia la superficie. Este proceso, documentado ampliamente en estudios previos, afectó la estabilidad térmica de la columna de agua y, a su vez, facilitó el transporte de nutrientes desde capas más



profundas hacia la superficie, resultando en un estímulo de la productividad primaria de manera temporal en la región (Emanuel, 2005; Sriviver y Huber, 2007).

Adicionalmente, los huracanes pueden modificar la SSM debido a las intensas precipitaciones asociadas. Estas precipitaciones disminuyen temporalmente la salinidad en las capas superiores, mientras que la mezcla vertical redistribuye agua más salina de capas más profundas hacia la superficie. En el Caribe mexicano, estas interacciones físicas tienen un impacto directo en la estabilidad de la columna de agua, influenciando procesos como la estratificación termohalina, los cuales son fundamentales para la dinámica oceánica posterior al paso del huracán. Tales perturbaciones son importantes para comprender los mecanismos que gobiernan la recuperación de los sistemas oceánicos después de eventos extremos (Emanuel, 2005).

Los impactos de Wilma también se extendieron más allá del océano. Las comunidades costeras de Quintana Roo experimentaron efectos devastadores, lo cuales incluyeron daños en infraestructura, pérdida de servicios básicos y alteraciones en las actividades socioeconómicas dependientes del turismo y la pesca. Estos eventos resaltan la necesidad de integrar el análisis de la resiliencia comunitaria en los estudios de impacto de huracanes, para diseñar estrategias que permitan una recuperación más eficiente y sostenible (Lin, Emanuel, Oppenheimer, Vanmarcke, 2020).

Este trabajo se centra en analizar las respuestas oceanográficas provocadas por el huracán Wilma en la porción noreste del estado de Quintana Roo en el periodo del 21 al 23 de octubre de 2005. Se hizo énfasis en las alteraciones en variables clave como la TSM, SSM y Chl-a, cuyos datos fueron de sensores remotos. Asimismo, se realizó el cálculo de las anomalías en estas variables en comparación con los patrones climatológicos promedio de la región.



► MATERIALES Y MÉTODOS

Datos satelitales

Se compilaron datos satelitales para el área de estudio ubicada en la porción noreste del estado de Quintana Roo (Figura 1). En esta región, el huracán Wilma permaneció aproximadamente 51 horas en el Caribe mexicano, el cual cubrió un área geográfica extensa debido a su gran diámetro. Según Pasch, Blake, Cobb III, and Roberts (2005), durante su fase de fortalecimiento, el ojo del huracán se contrajo a un diámetro de solo dos millas náuticas (n mi), lo que lo convirtió en el ojo más pequeño registrado por el personal del Centro Nacional de Huracanes (NHC). Posteriormente, cuando la intensidad del huracán disminuyó, el ojo se extendió a aproximadamente 40 millas náuticas el 20 de octubre. En el resto de su trayectoria, el diámetro del ojo se mantuvo considerablemente grande, fluctuando entre 40 y 60 millas náuticas. En resumen, el diámetro del ojo de Wilma varió de mínimo histórico de dos millas náuticas en su máxima intensidad hasta un rango de 40 a 60 millas náuticas en las fases posteriores del huracán.

Los datos satelitales incluyeron información termohalina del producto L4 de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (2024; https://data.marine.copernicus.eu/product/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047/description), los cuales consideraron los periodo de enero de 2003 a diciembre de 2007. Las incertidumbres asociadas a las mediciones fueron de ~ 0.03 °C para la temperatura superficial del mar (TSM) y ~ 0.2 para la salinidad superficial del mar (SSM; Olmedo, Martínez, Turiel, Ballabrera-Poy, Portabella, 2017; Meissner y Wentz, 2018). Asimismo, se utilizaron datos de clorofila-a (Chl-a) obtenidos de la plataforma MODIS-Aqua, con imágenes diarias y una resolución espacial de 4x4 km, proporcionados por la National Aeronautics and Space Administration (2021), correspondientes al mismo periodo de enero 2003 a diciembre 2007. Finalmente, se extrajeron datos diarios del viento con intervalos de una hora, correspondientes al mes de octubre de 2005, utilizando el producto de reanálisis ERA5 (Copernicus Climate Change Service; C3S, 2017). El análisis de viento se centró



exclusivamente en octubre de 2005 para evaluar las condiciones previas, durante y posteriores al huracán Wilma, ya que su impacto es particularmente evidente en este periodo.

Procesamiento

A continuación, se detalla el procesamiento de los datos oceanográficos satelitales realizados para cumplir con los objetivos de este estudio.

El periodo de estudio abarcó desde el 15 hasta el 25 de octubre de 2005, el cual cubre desde la formación del huracán Wilma hasta su ingreso al Golfo de México, con una trayectoria hacia Florida (NOAA, 2005). El área de estudio correspondiente a este periodo se ubicó entre los 15° y 23° de latitud norte y entre -86° y -87.5° de longitud oeste (Figura 1).

Los datos de TSM, SSM y Chl-a fueron procesados con el software MATLAB (MathWorks, 2024). Se generaron gráficos de cada variable (TSM, SSM y Chl) en función de la latitud y el tiempo, con el objetivo de resaltar las anomalías y variaciones a lo largo del área de estudio. Estos gráficos fueron diseñados para identificar los patrones espaciales y temporales de cada variable durante el paso del huracán.

Además, para identificar las variaciones atípicas en las variables estudiadas, se calcularon las anomalías de TSM, SSM y Chl-a en comparación con los promedios mensuales climatológicos. Los valores de anomalías iguales a 0 representan el promedio climatológico mensual, mientras que los valores positivos reflejan desviaciones por encima de este promedio y los valores negativos indican desviaciones por debajo. Este enfoque permitió evaluar con mayor detalle el impacto del huracán sobre las condiciones oceánicas.

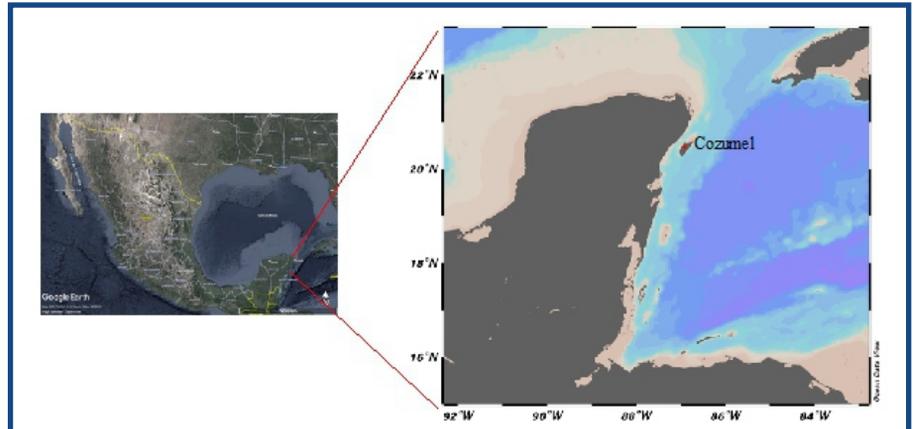


Figura 1. Porción noreste del estado de Quintana Roo (21.2° N y 86.9° W), área de mayor influencia del huracán Wilma.

Análisis estadístico bayesiano

Se aplicó un enfoque bayesiano basado en simulaciones de Monte Carlo mediante Cadenas de Markov (MCMC) para evaluar la probabilidad de cambios significativos en las variables estudiadas, al comparar las anomalías previas, durante y posteriores al paso de Wilma. Este análisis se realizó en MATLAB (MathWorks, 2024), generando distribuciones posteriores e intervalos de credibilidad para evaluar la robustez de los cambios observados. A diferencia de los métodos tradicionales basados en valores de p o coeficientes de correlación (r), este enfoque permite interpretar directamente las probabilidades de los escenarios analizados, incorporando y cuantificando las incertidumbres asociadas. El modelo bayesiano proporcionó un contexto probabilístico para las anomalías, ofreciendo una visión más detallada y matizada del impacto de Wilma en el sistema oceánico.

▶ RESULTADOS

La estacionalidad del área de estudio se clasifica en tres periodos: lluvias, secas y nortes (Márdero, Nickil, Schmook, Scheneider, Rogan, Christman, Lawrence, 2012). Durante la temporada de lluvias, fenómenos meteorológicos como depresiones, tormentas tropicales y huracanes afectan la región. Por su parte, la época de nortes se caracteriza por la presencia de vientos provenientes del noreste (NE), los cuales provocan un descenso en la temperatura y alcanzan velocidad que oscilan entre 4.5 - 10 $m s^{-1}$ (Rychlik, Wengang Mao, 2019).

Para evaluar el efecto de los vientos durante el huracán, se analizó el producto ERA5 exclusivamente para el mes de octubre del 2005. Los resultados mostraron que las velocidades más altas se registraron entre el 21 y el 25 de octubre, donde alcanzaron valores cercanos a los 20 m s^{-1} ($\sim 60 \text{ k h}^{-1}$; Figura 2). Estos vientos provocaron una intensa mezcla en la columna de agua, lo que tuvo implicaciones en las variables termohalinas y de Chl-a, como se detallan más adelante. La dirección del viento exhibió un patrón cíclico asociado al movimiento del ojo del huracán, consistente con las trayectorias típicas de los huracanes, caracterizadas por vientos que rotan en sentido antihorario debido a la fuerza de Coriolis.

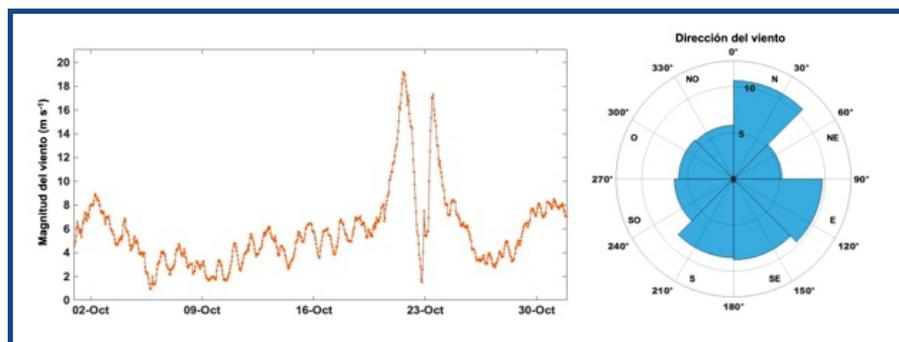


Figura 2. Magnitud (m s^{-1}) y dirección del viento para el periodo de octubre 2005. Los datos fueron obtenidos del producto de reanálisis ERA5 (Copernicus Climate Change Service, 2017), con una resolución diaria por hora a un cuarto de grado.

El análisis realizado de las variables de TSM, SSM, y Chl-a durante el periodo 2003 - 2007 permitió identificar tanto patrones estacionales (Figura 3) como las anomalías asociadas a estas variables en diferentes estaciones del año (Figura 4). La TSM y SSM presentaron oscilaciones con periodos de valores más bajos durante la temporada de nortes; mientras que los incrementos en estas variables estuvieron asociados a un aumento en la temperatura ambiental, lo que marca el inicio del verano, cuando alcanza su punto máximo. En contraste, a inicios de año, durante las temporadas de nortes y secas, se observaron los valores más bajos, con anomalías de -0.5° a -1° C para TSM y de 0 a -0.1 ups para la SSM. Lo que corresponde a fluctuaciones naturales del área bajo diferentes escenarios estacionales.

Los cambios observados en la Chl-a reflejaron las variaciones termohalinas; ya que, durante los meses de enero a abril, cuando la columna de agua experimenta una mayor mezcla debido a los nortes, los valores de Chl-a que se registraron fueron más altos ($0.2 - 0.4 \text{ mg m}^{-3}$) en comparación a los valores obtenidos para la segunda mitad del año ($<0.2 \text{ mg m}^{-3}$; Figura 3). Las anomalías positivas de Chl-a durante la época de nortes se ubicaron en el rango $0 - 0.04 \text{ mg m}^{-3}$; mientras que, las anomalías negativas de 0 a 0.06 mg m^{-3} indicaron un déficit de Chl-a, aunado con una columna de agua que se mantiene estratificada.

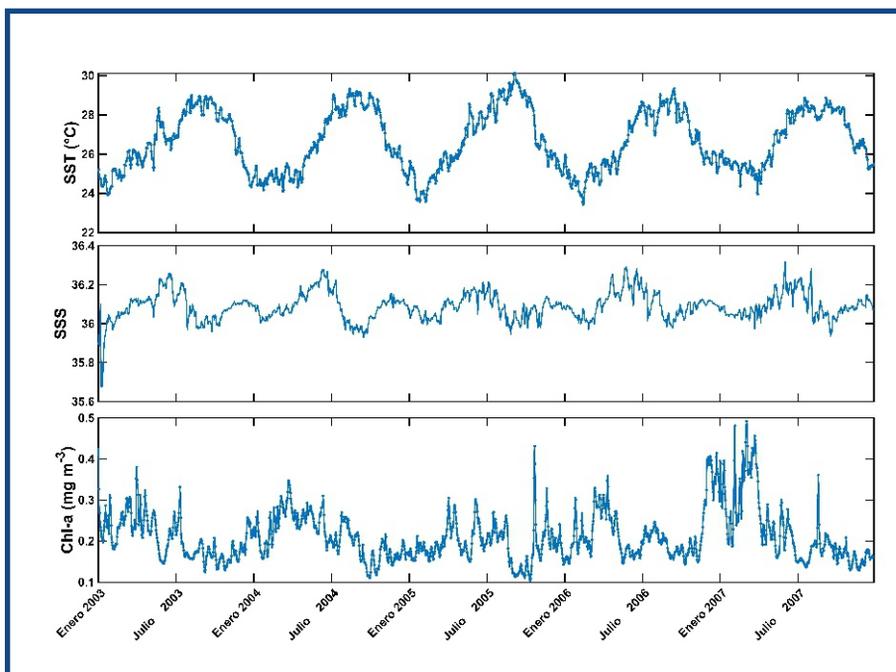


Figura 3. Series de tiempo de Temperatura superficial del mar (TSM), Salinidad Superficial del Mar (SSM) y clorofila a (Chl-a) de datos satelitales.

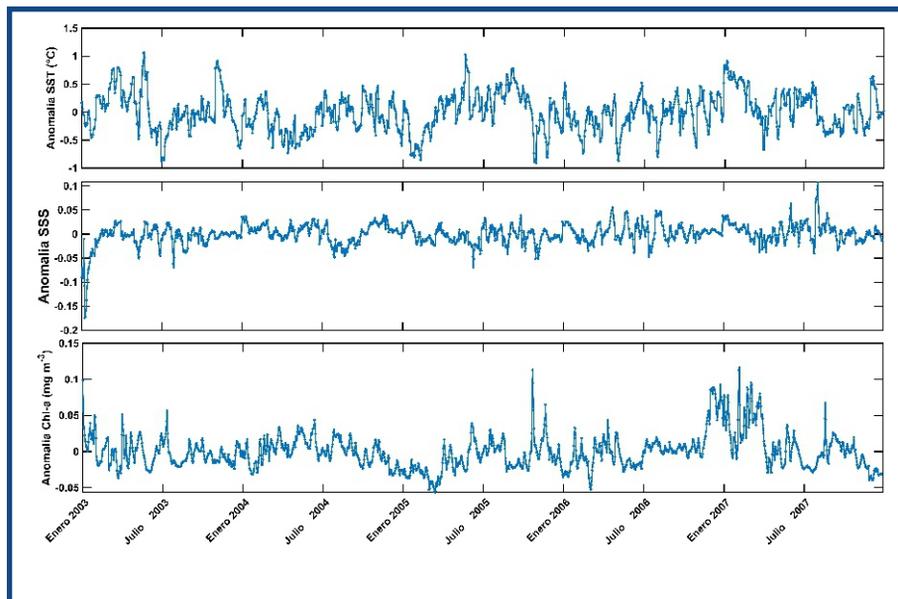


Figura 4. Anomalías de las series de tiempo de Temperatura superficial del mar (TSM), Salinidad Superficial del Mar (SSM) y clorofila a (Chl a) a partir de datos satelitales, las cuales fueron calculadas como diferencia entre los valores climatológicos y el valor promedio mensual.

En el mismo sentido, se realizó el análisis de TSM, SSM y Chl-a dentro de una ventana de tiempo específica (octubre 2005), con el objetivo de observar a detalle los cambios en estas variables antes, durante y después del huracán Wilma (Figura 5). Como se citó anteriormente, la TSM descendió de 0.2° a 1° C del 21 al 25 de octubre del 2005, respectivamente. En tanto que para estas fechas la SSM mantuvo valores cercanos al promedio al inicio de este periodo con ligera disminución posterior. Estas diferencias se debieron a un efecto combinado y enmascarado; es decir, la mezcla intensa indujo el afloramiento de agua con contenido mayor de salinidad a superficie. Efecto contrario fue el que se observó en los valores de Chl-a, ya que estos fueron más altos a posteriori al huracán, decayendo nuevamente a finales del mes.

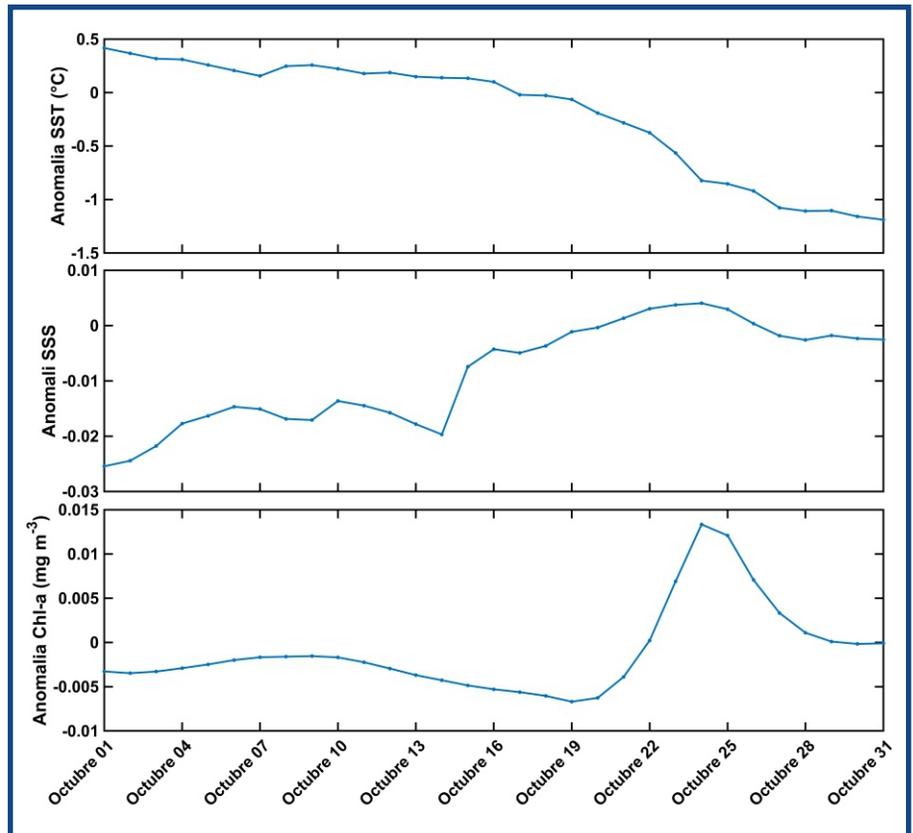


Figura 5. Anomalías de las variables de Temperatura superficial del mar (TSM), Salinidad Superficial del Mar (SSM) y clorofila a (Chl a) de datos satelitales para el mes de octubre de 2005.

Finalmente, los resultados de los análisis estadísticos indicaron la probabilidad de la diferencia entre los valores climatológicos y las condiciones durante el periodo en el que se presentó el huracán. En el caso de la TSM se reportó un 45% de probabilidad de que el valor observado durante el huracán Wilma sea mayor que el valor climatológico para TSM. Esto sugiere que hay una ligera tendencia hacia un aumento de SST durante el inicio del evento de Wilma en comparación con la climatología. Sin embargo, se detectó una tendencia hacia la disminución de esta variable durante el huracán (21 - 23 de octubre).

En tanto, la probabilidad de que SSM sea mayor que la climatología es ~67 %, lo que indica una distribución más equilibrada entre valores mayores y menores para la salinidad en ambos escenarios, tanto previo como durante el huracán. Con respecto a la Chl-a se estimó que existe un 68% de probabilidad de que la concentración de este pigmento sea mayor con respecto al valor climatológico durante y posterior al Wilma.

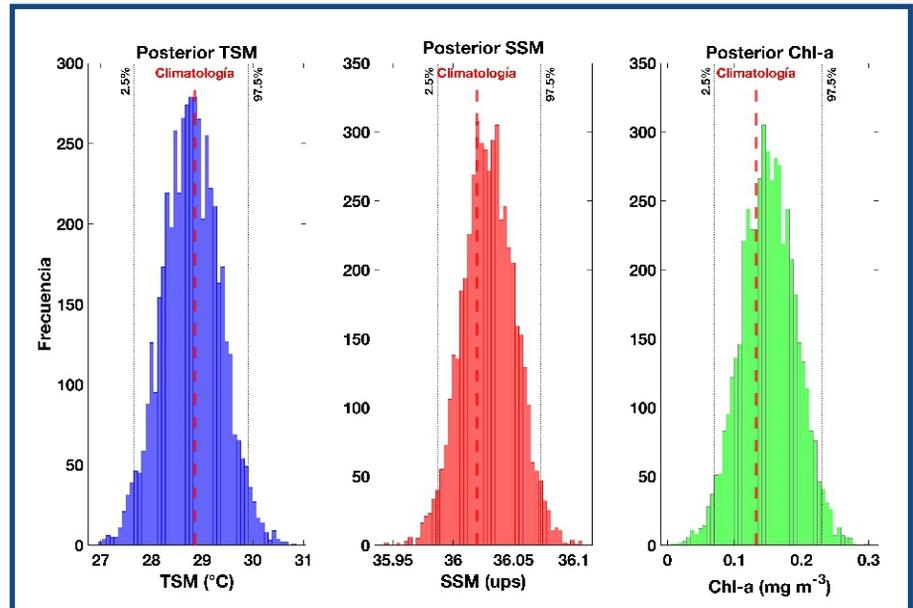


Figura 6. Frecuencias de las distribuciones a posteriori de la Temperatura Superficial del Mar (azul; TSM), Salinidad Superficial del Mar (rojo; SSM) y clorofila a (verde; Chl-a) calculados con modelo bayesiano mediante el uso de Monte Carlo Cadenas de Markov, a partir de datos satelitales de estas variables. La línea roja discontinua representa el promedio climatológico; las líneas negras discontinuas representan los intervalos de credibilidad al 95%.

DISCUSIÓN

Los resultados de este estudio muestran que el huracán Wilma tuvo un impacto significativo en la región de estudio, el cual generó cambios sustanciales en las variables de TSM, SSM y Chl-a. Estos cambios reflejan modificaciones en las condiciones oceánicas, lo que promovió procesos de mezcla vertical y redistribución de propiedades termohalinas, químicas y biológicas. Las anomalías observadas en estas tres variables fueron impulsadas por las altas velocidades de los vientos registrados, con rachas de hasta 240 km h⁻¹ (Martell-Dubois, Silva-



Casarin, Muñoz-Pérez, Cerdeira-Estrada, Escalante-Mancera, Liaz, 2018). La intensidad y persistencia de los vientos durante el periodo estacionario del huracán (21-23 de octubre) fueron factores determinantes en la mezcla vertical y el afloramiento de aguas de mayor profundidad hacia la superficie, lo que alteró la dinámica oceánica de la región.

Es importante destacar que los patrones de viento asociados al huracán generaron un enfriamiento adicional al aumentar la transferencia de calor desde la superficie del océano hacia la atmósfera, amplificando el efecto de la mezcla vertical. Este proceso promovió una redistribución de las propiedades termohalinas y químicas (por ejemplo, presión parcial de CO_2 y pH), lo que modificó los gradientes de densidad y facilitó una mayor mezcla vertical en la columna de agua. Estudios han demostrado que los nortes (vientos intensos) en el Golfo de México pueden causar una mezcla vertical extremadamente intensa, lo que favorecerá un transporte de nutrientes y carbono, aunque con un pH reducido, hacia la capa eufótica (Damien, Sheinbaum, Pasquero de Fommervault, Jouanno, Linacre, Dutiel, 2021; Cervantes-Díaz, Hernández-Ayón, Zirino, Herzka, Camacho-Ibar, Norzagaray, Barbero, Montes, Sudre, Delgado, 2022).

El análisis bayesiano reveló una alta probabilidad a posteriori de que la SSM permaneciera cercana a la media climatológica. Este resultado puede atribuirse al equilibrio entre dos factores: por un lado, el efecto de la mezcla vertical, que tiende a incrementar la salinidad al incorporar agua más salina de las capas subsuperficiales, y por otro, el aporte de agua dulce derivado de las intensas lluvias asociadas al huracán. Asimismo, aunque la precipitación podría haber reducido aún más la salinidad, este efecto fue contrarestando por el transporte de agua subsuperficial más salina, generado por la intensa mezcla vertical causada por los fuertes vientos ($\sim 20 \text{ m s}^{-1}$).

Estos cambios en salinidad y temperatura redujeron la estabilidad de la columna de agua, favoreciendo el afloramiento de nutrientes desde capas más profundas hacia la superficie. Este fenómeno se reflejó en un incremento en la biomasa fitoplanctónica, evidenciado por los valores más altos de Chl-a ($\sim 0.45 \text{ mg m}^{-3}$; Figura 2). Las anomalías de Chl-a



($\sim 0.02 \text{ mg m}^{-3}$; Figura 4) confirmaron un aumento en la actividad fitoplanctónica, con un desfase de 1 a 2 días respecto al paso del huracán. Este retraso es consistente con el tiempo necesario para que los organismos fitoplanctónicos respondan al enriquecimiento de nutrientes. Aunque no se disponía de datos directos sobre nutrientes en la columna de agua, el análisis de imágenes satelitales de Chl-a proporcionó un proxy confiable para evaluar la biomasa fitoplanctónica durante el evento.

Cabe señalar que el análisis bayesiano empleado en este estudio permitió cuantificar los cambios observados y asociarlos de manera probabilística con los efectos directos del huracán Wilma. Este enfoque aportó un marco riguroso para evaluar la significancia de las anomalías, lo cual resulta particularmente valioso en eventos extremos, donde la heterogeneidad espacial y temporal puede complicar el análisis de los impactos.

Uno de los principales hallazgos de este estudio fue la identificación de un enfriamiento durante el paso de Wilma, un fenómeno que ha sido observado en otros estudios de huracanes en diferentes regiones. Estos resultados son de gran relevancia, ya que destacan la sensibilidad del sistema oceánico de la región a huracanes intensos y a sus efectos en la redistribución de nutrientes, lo que puede alterar la estructura de las comunidades marinas y modificar la dinámica de las redes tróficas.

Este estudio contribuye a la comprensión del impacto de huracanes en el sistema oceanográfico del Caribe mexicano, donde Wilma se consideró uno de los tres huracanes de categoría 5 registrados más destructivos en las últimas décadas que impactaron las costas de Quintana Roo. Estas evidencias se tornan relevantes en un contexto del cambio climático, donde se espera un aumento en la frecuencia e intensidad de estos fenómenos. Las metodologías empleadas, que incluyen el análisis de datos satelitales y modelos bayesianos, proporcionan un marco robusto que puede aplicarse en el estudio de otros eventos extremos. Además, esta investigación no solo profundiza en la respuesta oceanográfica ante huracanes, sino también proporciona herramientas valiosas para optimizar el análisis de sus impactos.



Finalmente, el impacto de Wilma subrayó la importancia de considerar los factores ambientales y los riesgos de desastres naturales tanto para el ecosistema como para la sociedad (Nicholls, Hoozemans, Marchand, 1999). El huracán resaltó la importancia de conservar los ecosistemas costeros naturales, como los arrecifes de coral y los manglares, que funcionan como barreras naturales contra tormentas y ayudan a proteger las comunidades costeras (Alongi, 2008).

En resumen, el huracán Wilma generó alteraciones significativas en las condiciones oceanográficas del Caribe mexicano, afectando las variables de TSM, SSM y Chl-a. La mezcla vertical inducida por los fuertes vientos del huracán promovió el afloramiento de aguas más frías y salinas, lo que, a su vez, contrarrestó el efecto de las lluvias torrenciales que aportaron agua de baja salinidad. Este fenómeno también impulsó un incremento en la biomasa fitoplactónica, reflejado en el aumento de la Chl-a. Dado el contexto de cambio climático, que prevé un aumento en la intensidad de huracanes, este estudio ofrece un enfoque metodológico sólido, combinando datos satelitales y modelos bayesianos, que puede ser clave para fortalecer la gestión y conservación de estos ecosistemas, así como para el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación ante futuros eventos climáticos extremos.

► CONCLUSIONES

El presente estudio evidencia los profundos impactos del huracán Wilma en las condiciones oceanográficas y sociales de la región del Caribe mexicano. A través del análisis de datos satelitales, modelados con un enfoque probabilístico bayesiano, se identificaron cambios significativos en las variables de Temperatura Superficial del Mar (TSM), Salinidad Superficial del Mar (SSM) y clorofila-a (Chl-a), los cuales reflejan las dinámicas de mezcla vertical y redistribución de propiedades termohalinas en respuesta a los fuertes vientos y precipitaciones extremas asociadas al evento. Este enfoque permitió cuantificar, con un marco robusto, las probabilidades de las anomalías



observadas, y proporciona una perspectiva detallada de los procesos físicos y biológicos involucrados.

Los resultados indican que el huracán generó un enfriamiento de la columna de agua, acompañado por un incremento temporal en la biomasa fitoplanctónica, evidenciado por el aumento en los valores de Chl-a. Estos fenómenos se relacionaron con el afloramiento de aguas subsuperficiales ricas en nutrientes, lo que favoreció temporalmente la productividad primaria en la región. Sin embargo, la interacción entre la precipitación torrencial y la mezcla vertical mostró un balance complejo que mitigó los cambios extremos en la salinidad superficial.

El estudio reconoce como una limitante la ausencia de mediciones directas de variables como nutrientes, pH, entre otras, en la columna de agua, lo que podría reforzar la interpretación de los procesos biogeoquímicos. Además, se subraya que los hallazgos están circunscritos al contexto regional y temporal analizado, por lo que futuros estudios deberían considerar análisis más amplios que incluyan otros sistemas costeros y una resolución temporal extendida.

En un contexto de cambio climático, donde se prevé un aumento en la frecuencia e intensidad de huracanes, los hallazgos de este estudio ofrecen herramientas valiosas para el monitoreo y análisis de eventos extremos. El enfoque combinado de imágenes satelitales y modelado bayesiano proporciona un marco metodológico replicable, que resulta clave para fortalecer estrategias de gestión ambiental, conservación de ecosistemas costeros y mitigación de impactos climáticos. Este trabajo enfatiza la importancia de integrar esfuerzos interdisciplinarios para comprender mejor la interacción entre fenómenos extremos y sistemas oceánicos, promoviendo la resiliencia de las comunidades y ecosistemas costeros ante desafíos climáticos futuros.



► LITERATURA CITADA

Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection, and management. *Marine Pollution Bulletin*, 56(3), 806-815. [10.1016/j.ecss.2007.08.024](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024) [https://](https://doi.org/10.1016/j.ecss.2007.08.024)

Beven, J. L., Brown, D. P., Franklin, J. L., Knabb, R. D., Pasch, R. J., & Stewart, S. R. (2008). Atlantic Hurricane Season of 2005. *Monthly Weather Review*, 136(3), 1109–1173. <https://doi.org/10.1175/2007MWR2074.1>

Cervantes-Díaz, G. Y., Hernández-Ayón, J. M., Zirino, A., Herzka, S. Z., Camacho-Ibar, V., Norzagaray, O., Barbero, L., Montes, I., Sudre, J., Delgado, J. A. (2022). Understanding upper water mass dynamics in the Gulf of Mexico by linking physical and biogeochemical features. *Journal of Marine Systems*, 225, 103647. doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103647

Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), *Noviembre 2024*. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

Copernicus Marine Environment Monitoring Service, CMEMS. (2014). Global Ocean Gridded L 4 Sea Surface Heights and Derived Variables Reprocessed 1993 Ongoing. Level 4. doi.[10.48670/moi-00148](https://doi.org/10.48670/moi-00148)

Damien, P., Sheinbaum, J., Pasqueron de Fommervault, O., Jouanno, J., Linacre, L., and Duteil, O. (2021). Do Loop Current eddies stimulate productivity in the Gulf of Mexico? *Biogeochemistry*, 18, 4281-4303. <https://doi.org/10.5194/bg-18-4281-2021>.

Emanuel, K. (2005). Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years. *Nature*, 436(7051), 686–688. <https://doi.org/10.1038/nature03906>

Knutson, T. R., Camargo, S. J., Chan, J. C., Emanuel, K., Ho, C.-H., Kossin, J., & Wu, L. (2019). Tropical cyclones and climate change assessment: Part I. Detection and attribution. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 100(10), 1987–2007. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0189.1>



Lin, N., Emanuel, K. A., Oppenheimer, M., & Vanmarcke, E. (2020). Physically based assessment of hurricane surge threat under climate change. *Nature Climate Change*, 2(6), 462–467. <https://doi.org/10.1038/nclimate1389>

Márdero, S., Nickl, E., Schmoock, B., Schneider, L., Rogan, J., Christman, Z., Lawrence, D. (2012). Sequías en el sur de la península de Yucatán: análisis de la variabilidad anual y estacional de la precipitación. *Inv. Geo.* 78, 19-33. <https://doi.org/10.14350/rig.32466>

Martell-Dubois, R., Silva-Casarin, R., Mendoza-Baldwin, E. G., Muñoz-Pérez, J. J., Cerdeira-Estrada, S., Escalante-Mancera, E., & Laiz, I. (2018). Spectral bimodality of waves produced by hurricanes in the Caribbean coastal zone off Mexico. *Ciencias Marinas*, 44(1), 33–48. <https://doi.org/10.7773/cm.v44i1.2717>

Nicholls, R. J., Hoozemans, F. M. J., & Marchand, M. (1999). Increasing flood risk and wetland losses due to global sea-level rise: Regional and global analyses. *Global Environmental Change*, 9(1), S69-S87. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(99\)00019-9](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(99)00019-9)

National Aeronautics and Space Administration, NASA. (2021). Goddard Space Flight Center, Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group. Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Aqua (Daily Chlorophyll 4 Km Data.) NASA Ob. DAAC, Greenbelt, MD, USA (2021), [10.5067/AQUA/MODIS/LM3/CHL/2018](https://doi.org/10.5067/AQUA/MODIS/LM3/CHL/2018) Accessed on 30/08/2024

Olmedo, E., Martínez, J., Turiel, A., Ballabrera-Poy, J. and Portabella, M. (2017). Debaised non-Bayesian retrieval: A novel approach to SMOS Sea Surface Salinity. *Rem. Sens. Env.* 193, 103-126. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.02.023>

Pasch, R.J., Blake, E.S., Cobb III, H. D., & Roberts, D.P. (2005). Tropical Cyclone Report Hurricane Wilma 15-25 October 2005. National Hurricane Center. https://www.nhc.noaa.gov/data/tcr/AL252005_Wilma.pdf



Sánchez-Rivera, G., Frausto-Martínez, O., Gómez-Morales, L., Terán-Cuevas, A., & Morales-Hernández, J. (2021). Tropical Cyclones in the North Atlantic Basin and Yucatan Peninsula, Mexico: Identification of Extreme Events. *IJDNE*, 16 (2) 145-160, <https://doi.org/10.18280/ijdne.160204>

Sriver, R. L., & Huber, M. (2007). Observational evidence for an ocean heat pump induced by tropical cyclones. *Nature*, 447(7144), 577–580. <https://doi.org/10.1038/nature05785>



Artículo Científico

Arrecifes coralinos en Mahahual: estado de conservación actual e importancia de una gestión local

Mahahual coral reefs: current conservation status and the relevance of local management



latindex



CREATIVE COMMONS

 OPEN ACCESS

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el origina

 1. Ana Daniela Romero García

 **id** 0009-0003-0923-7768

MARES Center

 2. Nadia Sandoval Laurrabaquio Alvarado

 **id** 0009-0007-8537-646X

ECOSUR y MARES Center

Autor de correspondencia: nadia@takataexperience.com

 3. María Geovana León Pech

 **id** 0000-0001-9521-2257

Tecnológico Nacional de México /
Instituto Tecnológico de Chetumal

 4. Cassiopea Carrier Doneys

 **id** 0009-0007-6013-8430

MARES Center

 5. Esmeralda Pérez Cervantes

 **id** 0000-0002-4244-9004

Laboratorio de Biodiversidad Arrecifal y Conservación, Unidad Académica de Sistemas Arrecifales, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, UNAM,



Arrecifes coralinos en Mahahual: estado de conservación actual e importancia de una gestión local.

Mahahual coral reefs: current conservation status and the relevance of local management.

▶ RESUMEN

Los arrecifes de Mahahual pertenecen al Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), una región de alta biodiversidad que sustenta la economía de numerosas familias. Sin embargo, este ecosistema se encuentra bajo una fuerte presión debido a factores globales como el cambio climático y la contaminación, así como a factores locales como el desarrollo costero no sostenible y el turismo masivo. Este estudio constituye una evaluación reciente y detallada de 10 parches arrecifales en Mahahual, realizado durante 2021 y 2022 utilizando el protocolo Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment para el monitoreo de Coral (AGRRA por sus siglas en inglés). Los resultados mostraron una muy baja cobertura de coral duro (%LC = 9.2 en promedio) y una alta cobertura macroalgal (%FMA = 16.6 en promedio). No obstante que la biomasa de peces comerciales es alta en promedio (BPC = 2,719.6 g/100 m²), presenta una alta variabilidad entre sitios y baja biomasa de peces herbívoros (BPH = 1,746.6 g/100 m² en promedio), además, fueron registradas muy bajas densidades de invertebrados móviles (0.015 individuos por m² en promedio). Los resultados en conjunto evidencian un marcado deterioro ecológico en el arrecife estudiado, resaltando la urgencia de implementar medidas a nivel local que aseguren la conservación del ecosistema marino y el cumplimiento de la normativa ambiental vigente en la región.

Palabras Clave: AGRRA, arrecifes de coral, Mahahual, degradación ambiental



▶ ABSTRACT

The Mahahual reefs are part of the Mesoamerican Barrier Reef System (MBRS), a region of high biodiversity that supports the economy of numerous families. However, this ecosystem is under great pressure due to global factors such as climate change and pollution, and local factors like unsustainable coastal development and mass tourism. This study presents a recent and detailed assessment of 10 reef patches in Mahahual, conducted during 2021 and 2022 using the Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) monitoring protocol. The results showed a very low hard coral cover (%LC = 9.2 on average) and a high macroalgal cover (%FMA = 16.6 on average), indicating severe ecological degradation. Although the biomass of commercial fish is high on average (BPC = 2,719.6 g/100 m²), it presents a high variability among sites and low biomass of herbivorous fish (BPH = 1,746.6 g/100 m² on average). Additionally, very low densities of mobile invertebrates (0.015 individuals per m² on average) were recorded, indicating a severe ecological degradation in the sampled area, thus urging the need to establish local measures to ensure the protection of the marine ecosystem and compliance with environmental laws applicable in this locality.

Key Words: AGRRA, coral reefs, Mahahual, environmental degradation

▶ INTRODUCCIÓN

Los arrecifes de coral son sitios que albergan una alta biodiversidad y proveen valiosos servicios ambientales (Veron, 2000; McField y Kramer, 2007; Calderón et al., 2017), sin embargo, diversas amenazas los han situado dentro de los ecosistemas en mayor riesgo a nivel mundial (Daltabuit Godás, 1999, Arguelles et al., 2019). En el caso particular del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), a las amenazas globales como cambio climático y contaminación se han sumado numerosas a nivel regional como la presencia de especies invasoras, turismo en masa, desarrollo social no sostenible y enfermedades (Arias et al., 2017; Rioja-Nieto y Alvarez-Filip, 2018; Alvarez-Filip et al., 2019) que han ocasionado pérdidas, principalmente de especies clave



como los corales hermatípicos, y disminuciones poblacionales de vertebrados e invertebrados herbívoros, por ejemplo, peces loro, cangrejos rey y erizos (Ruiz-Zárata et al., 2003; Alvarado et al., 2015; de Alba, 2020; McField et al., 2022), relacionados con el estado de salud del arrecife (Kramer et al., 2015; McField et al., 2022). Conocer el estado y los cambios experimentados a través del tiempo en los ecosistemas arrecifales a nivel global, regional y local es esencial para establecer medidas encaminadas a su continuidad en el futuro

Desde el 2005, la Iniciativa de Arrecifes Saludables para Gente Saludable, ha utilizado el protocolo denominado AGRRA (por sus siglas en inglés para Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment) para la evaluación del SAM de manera simultánea y bianual en los 4 países que lo conforman: México, Belice, Guatemala y Honduras (Feingold et al., 2003; Lang et al., 2012; AGRRA, 2018). Las evaluaciones revelaron variaciones significativas en el estado de conservación entre los diferentes países y subregiones del SAM, que en el caso de México son cinco: la zona norte, centro y sur del Caribe Mexicano, Cozumel y Banco Chinchorro (WWF, 1999; Barón, 2017).

La subregión Sur está conformada por los arrecifes de las localidades de Mahahual e Xcalak, que históricamente ha sido menos monitoreada que otras en el Caribe mexicano (Contreras-Silva et al., 2020). Los resultados de las evaluaciones sugieren que los distintos niveles de degradación observados en estos sitios podrían atribuirse a sus diferentes niveles de protección y desarrollo costero (Díaz-Pérez et al., 2016; Díaz-Osorio et al., 2022), lo cual es importante a considerar en Mahahual, una zona que carecía de algún tipo de denominación como Área Natural Protegida (ANP) hasta el año 2016 en que se volvió parte de la Reserva de la Biósfera del Caribe Mexicano (DOF, 2016), y cuyo puerto de cruceros se encuentra entre los primeros lugares de personas recibidas a nivel nacional (SECTUR, 2014-2022).

Todos estos años sin medidas de protección particulares y de turismo en masa han agravado el deterioro de sus arrecifes (Arias et al., 2017; Rodríguez, 2019), lo que junto con el desarrollo costero actual y proyectado a futuro, como el tren Maya y aeropuerto de Tulum, suponen una grave amenaza para este sitio debido al potencial aumento de



visitantes, poniendo en riesgo un sitio de alta importancia turística y ecológica (Arias et al., 2017), así como de zonas aledañas que ya han presentado señales de deterioro ambiental (Figueroa-Zavala et al., 2015).

La conservación de los ecosistemas requiere la implementación de estrategias de manejo tanto en áreas protegidas como no protegidas, de modo que se puedan aprovechar de manera sostenible sus recursos naturales (Toledo, 2005; Barranco, 2010; López, 2011). Evaluar el estado de los ecosistemas arrecifales mediante un monitoreo sistemático es necesario para la implementación de planes y estrategias de manejo, considerando su actual deterioro ecosistémico y disminución drástica de diversidad biológica.

La proximidad del 80 % de los arrecifes del SAM a la línea costera los hace altamente vulnerables a las actividades humanas (Álvarez y Wong, 2015). Existe la necesidad de un plan de manejo integral que incluya programas regionales y locales para reducir activamente el impacto de la contaminación de las cuencas y las descargas de aguas residuales; así como acuerdos y legislaciones proactivas para mejorar el estado de los arrecifes en beneficio de la ecología y economía de las diferentes comunidades que dependen de ellos (Gutiérrez et al., 2013; Andrade, 2018).

Mahahual pasó de ser un pueblo pescador a presentar un acelerado desarrollo turístico denominado “Costa Maya” aproximadamente hace 23 años, dando como resultado estar entre los primeros lugares de personas recibidas a nivel nacional en su puerto de cruceros (SECTUR, 2014-2022; Sosa e Inés, 2014), proveyendo servicios turísticos como el buceo recreativo, el snorkel, la pesca, navegación y hospedaje lo que, considerando también los asentamientos urbanos en aumento, resalta la necesidad de actualizar y aumentar los datos de esta localidad para saber el estado de conservación actual de sus parches coralinos y plantear un plan de acción inmediata para el manejo, preservación y la explotación sostenible turística de la zona.



La disminución de la cobertura de coral inició desde los años 70 en el Caribe. En un estudio de largo plazo se reportó una disminución de la cobertura del 26 % en 1970, y de 16 % en 2016, mientras que las macroalgas fueron el grupo bentónico que ha ido en aumento hasta un 30 % de cobertura en 2016 (Contreras-Silva et al., 2020). En la actualidad, la mayoría de los arrecifes del Caribe mexicano ya no se encuentran dominados por corales duros.

Los programas de monitoreo en el Caribe iniciaron a finales de los años 70. Sin embargo, no fue hasta 1980 cuando la degradación coralina se hizo más evidente. Estos proyectos tomaron un alto valor y se iniciaron los planes para seguir informalmente con la recolección de datos, hasta que McField et al. (2005) junto con Arrecifes Saludables empezaron con su iniciativa en el Sistema Arrecifal Mesoamericano.

De acuerdo con los datos recabados por la Iniciativa de Arrecifes Saludables para Gente Saludable, la condición general del arrecife mesoamericano ha empeorado desde el 2018, después de que había presentado una recuperación (reportes 2020 y 2022), lo anterior puede explicarse debido a diversos factores en los diferentes países que conforman esta región (México, Belice, Guatemala y Honduras) que afectan en cierta medida a cada uno de los parámetros que se utilizan para la generación del índice de salud arrecifal: cobertura de coral, cobertura de macroalgas carnosas, presencia de peces herbívoros y comerciales.

Para el 2018, se tenía registros de entre 15 y 20 % de cobertura de coral en la mayoría de los arrecifes de la región del Caribe mexicano y los datos de macroalgas carnosas y biomasa de peces herbívoros mostraban una tendencia en aumento, además de la pérdida de hábitat de pastos marinos, por lo que se sugería establecer nuevas áreas protegidas en la región y mayor apoyo de financiación (Rioja-Nieto y Alvarez-Filip 2018). En el 2018 se registró el primer brote de la enfermedad de pérdida de tejido en el Caribe mexicano, donde se observó un incremento en la mortalidad de especies susceptibles y cambios drásticos en la estructura de las comunidades coralinas de la región (Alvarez-Filip, *et al.* 2019).

Particularmente, Ruíz-Zárate, *et al.* (2003) encontraron que los arrecifes en Mahahual tenían una cobertura de coral vivo de aproximadamente 17 %, demostrando una disminución de aproximadamente el 54.53 % en 24



años, es decir, un 2.7 % de pérdida anual, si se toma en cuenta el promedio obtenido en este estudio de 9.27 %. Mientras que en la región de Uvero-Punta Piedras, una localidad cercana a Mahahual se reportó en 2015 una dominancia de macroalgas de 61 %, seguida por 12.4 % de corales blandos y 8.2 % de corales duros, además, se encontraron valores de densidad de peces de entre 83 ± 25 ind/100 m² a 144 ± 124 ind/100 m². Estos resultados sugieren una tendencia a la disminución en la estructura de la comunidad arrecifal (Figuroa-Zavala et al., 2015).

En Mahahual también se ha documentado un cambio de fase de coral a algas principalmente relacionado al desarrollo costero, lo que compromete la resiliencia y sobrevivencia de los arrecifes en esta localidad (Arias-González et al., 2017).

La mayoría de los estudios han resaltado que las actividades humanas limitan la eficacia de la protección y conservación de los ecosistemas arrecifales. Se ha demostrado que la cobertura de coral depende de la protección e intensidad de las actividades humanas como es el desarrollo costero (Suchley y Alvarez-Filip 2018).

► MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio fue llevado a cabo en Mahahual, una localidad en el estado de Quintana Roo, México, ubicado en el municipio de Othón P. Blanco (Fig. 1a.), entre las coordenadas $18^{\circ} 15'$ - $18^{\circ} 45'$ latitud norte y $87^{\circ} 40'$ - $87^{\circ} 55'$ longitud oeste (Can, 2003; Chávez-Hidalgo, 2009; Hirales et al., 2010). Solía ser una localidad principalmente de pescadores, sin embargo, a partir de 1997 se inicia un proceso de desarrollo turístico en la zona, particularmente acelerada con la construcción de un muelle para cruceros, parte del megaproyecto turístico denominado “Costa Maya”, que hizo de Mahahual una zona altamente turística (Escalante y Carrol, 2013; SECTUR, 2014-2022).

Los parches arrecifales de Mahahual, forman parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), el cual se extiende por más de 1,000 km, en el Atlántico Occidental (Aguilar, 1998). En Mahahual, el arrecife coralino es de tipo barrera, con una extensión de 3,600 metros aproximadamente y se divide en tres zonas principales: laguna arrecifal, cresta arrecifal y arrecife frontal. (Chávez, Hidalgo, 2009; Arias-González et al., 2017).

El muestreo de este estudio fue realizado en seis sitios de la localidad durante el mes de junio del 2022, mediante el protocolo de monitoreo AGRRA (Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment, por sus siglas en inglés), metodología estandarizada mediante la cual se generan bases de datos que permiten detectar cambios de la comunidad bentónica, coralina y de algunas especies de peces, así como estimar un índice de salud arrecifal relacionado con el estado de conservación de los sitios, centrándose en 4 estimadores: la cobertura coralina, la cobertura de macroalgas carnosas, la biomasa de peces comerciales y la biomasa de peces herbívoros (Fig. 1 b).

Cabe señalar que los sitios muestreados son utilizados de forma regular para el buceo recreativo y están ubicados en el arrecife frontal: Dos ojos, Tortugas, Río Bermejo, Acuario, Escalones y 40 Cañones. Se incorporaron al análisis los datos de cuatro sitios muestreados en la misma localidad durante septiembre del 2021 con la misma metodología, por el equipo de Arrecifes Saludables: Cocos, San Francisco, Puerto Bravo y Faro Viejo (Fig. 1 c).

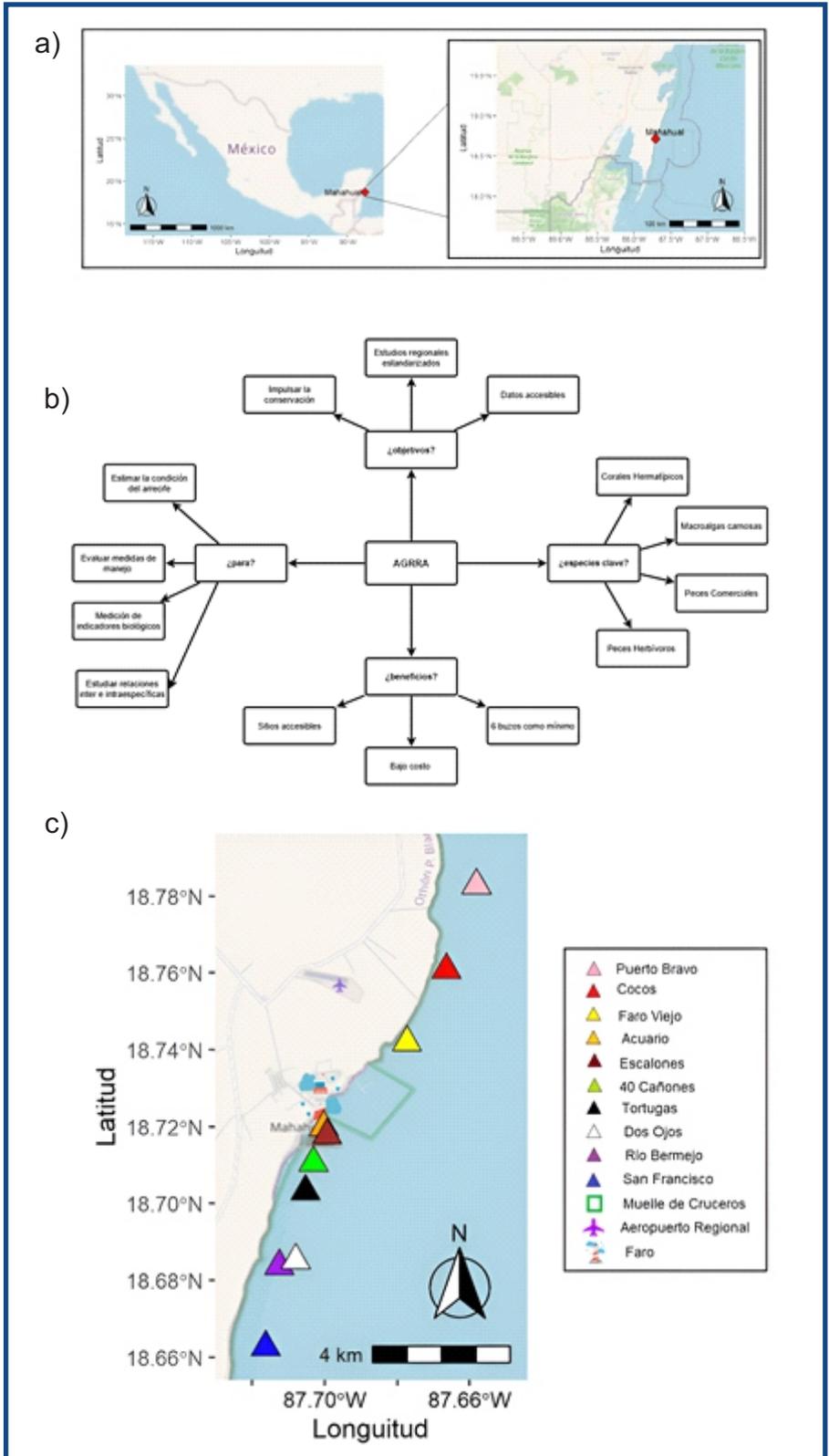


Figura 1. a) Ubicación Geográfica de Mahahual; b) Protocolo AGRRA; c) Sitios de muestreo.



El protocolo de AGRRA consiste en la realización de transectos submarinos en los cuales se identifican especies clave de tres grupos: corales, bentos y peces. Los transectos en el caso de la evaluación de corales y bentos se delimitan por una cuerda plomada de 10 m de largo y un cuadrante de PVC de 25 x 25 cm, mientras que para el monitoreo de peces se miden una cinta métrica de 30 m de largo que es atada al chaleco del buceador y que se va desenrollando mientras el buzo nada, a una velocidad constante que permita terminar el transecto en aproximadamente 6 minutos.

Se realizaron de uno a dos transectos para corales, seis para bentos y de siete a ocho para peces en cada sitio, en un rango de profundidad de 6 a 15 metros. A lo largo de cada transecto se censaron las especies de corales, peces y bentos (incluyendo algas e invertebrados móviles) consideradas en el protocolo AGRRA (<https://www.agrra.org/training-tools>). Así como una aproximación del tamaño de cada pez registrado de acuerdo a las categorías descritas en la metodología mencionada y tamaño de las colonias coralinas.

En cada sitio se determinó la composición bentónica (por porcentaje) considerando los 12 grupos morfofuncionales de la metodología AGRRA: invertebrados móviles, invertebrados agresivos para los corales duros, otros invertebrados, peyssonnelias, cianobacterias, algas incrustantes, macroalgas calcáreas, macroalgas carnosas, alfombra de algas, tapete algal con sedimentos, tapetes de turf y coral vivo (sólo considerando corales hermatípicos).

Los datos obtenidos fueron analizados por el equipo de la Iniciativa Arrecifes Saludables para Gente Saludable, quienes los procesaron de la misma manera que se hace para el monitoreo bianual del Arrecife Mesoamericano, con la finalidad de poder ser comparados con las evaluaciones realizadas en la localidad, en el Caribe de México y en el SAM. Con los datos del monitoreo se estimó el porcentaje de cobertura coralina (%LC), porcentaje de macroalgas carnosas (%FMA), la densidad de invertebrados móviles (#individuos/m²), composición arrecifal por sitio, biomasa (g/100 m²) de peces herbívoros (BPH) y 4) biomasa (g/100 m²) de peces comerciales (BPC). Parámetros mediante



los cuales se calculó el Índice de Salud Arrecifal (ISA) por sitio de muestreo, y general para Mahahual.

Para estimar el %LC se tomaron en cuenta todas las colonias individuales registradas de corales hermatípicos y se obtuvo su porcentaje relativo considerando las especies del método AGRRA, para el %FMA se estimó la biomasa algal, considerando dos parámetros: porcentaje de cobertura algal (el cual se estima con los registros de los cuadrantes) y su altura, mientras que para la biomasa de peces se utiliza una fórmula de longitud – peso ($W=a(L)^b$), en donde la L es la longitud estimada por la mediana de la longitud para cada familia de peces, los coeficientes a y b son características específicas de las dietas de las especies (herbívoros, invertívoros y piscívoros) e importancia comercial, que se obtienen por regresiones lineales del peso y longitud de especímenes datados y se calcula para cada familia) junto con la densidad que se estima con el número los peces registrados entre 100 m^2 y tamaño (Marks, 2008).

Para evaluar si existe un agrupamiento entre las localidades en función de su composición bentónica y coralina se realizó el Análisis de Escalamiento Multidimensional (NMDS, por sus siglas en inglés) y un agrupamiento jerárquico con el algoritmo UPGMA, en ambos se utilizó el índice de similitud de Bray Curtis. Los datos fueron transformados con la transformación de Box-Cox utilizando el programa computacional Past 4.13 (Hammer et al., 2001).

▶ RESULTADOS

La composición bentónica por sitio estuvo conformada por entre 3.3 y 12.7 % de coral hermatípico vivo (%LC), con un promedio de 9.27 %. El grupo morfofuncional que sobresalió fue el tapete algal con sedimentos (TAS) conformando entre 5.7 % a 40 % por sitio, con un promedio de 19.31 %, seguido de las macroalgas carnosas (FMA) con un rango de 6.2 % a 31.4 % con un promedio de 16.6 % y las macroalgas calcáreas (CMA) entre 3.4 % a 20.2 % con un promedio de 12.25 %. Los invertebrados móviles presentaron una densidad de 0.015 individuos por m^2 en promedio, representando el 0.01 % de la composición bentónica (Fig. 2a). Además, el análisis de MDS y el cluster de la composición bentónica, mostraron un agrupamiento de los sitios de Dos Ojos, Acuario, Escalones, Tortugas y Río Bermejo, mientras que los sitios de Faro Viejo, Cocos; Puerto Bravo y 40 Cañones no se agruparon (Fig. 2b; 2c).

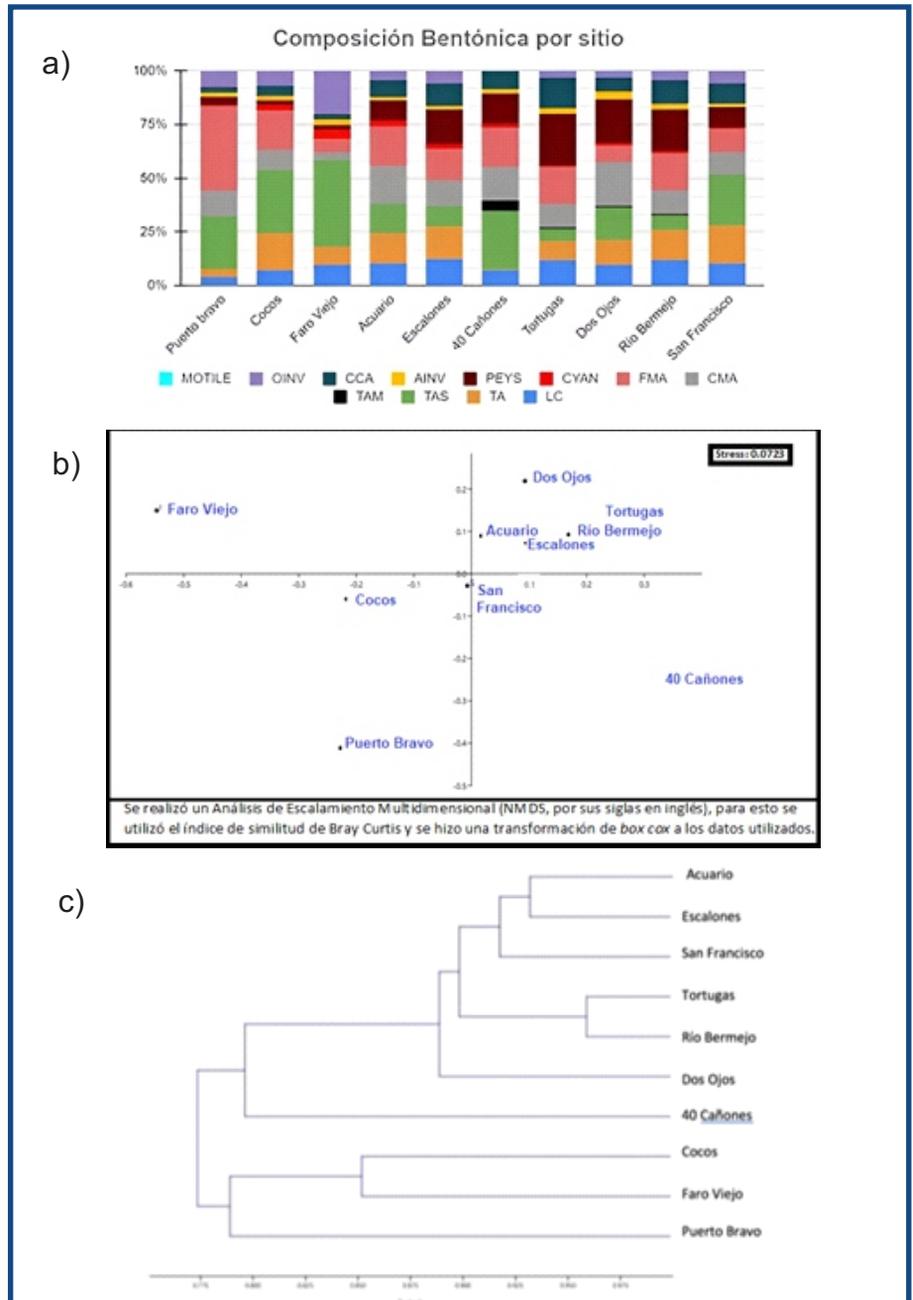
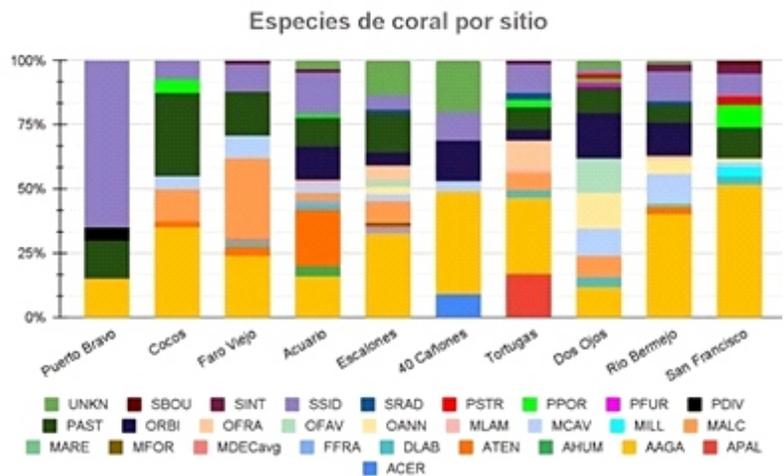


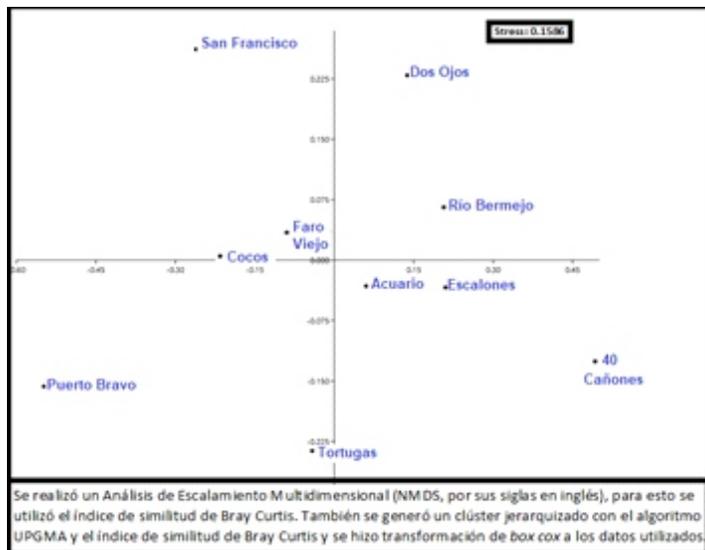
Figura 2. a) Grupos Morfofuncionales que conforman el Bentos de los sitios muestreados. En donde: MOTILE (Invertebrados móviles), OINV (Otros Invertebrados), CCA (Alga coralina costrosa), AINV (Invertebrados agresivos), PEYS (Peyssonnelias), CYAN (Cianobacterias), FMA (Macroalgas Carnosas), CMA (Macroalgas calcáreas), TAM (Alfombra de algas), TAS (Alga Tapete con sedimentos), TA (Alga tapete) y LC (Coral vivo). b y c) Los resultados que se generaron con los datos transformados muestran cuatro grupos en función de la composición bentónica, el primero formado por los sitios de Puerto Bravo y Cocos; el segundo grupo está representado por el sitio de 40 cañones y San Francisco; el tercer grupo Faro Viejo y el cuarto grupo por las localidades restantes. El grupo 1 conformado por Puerto Bravo y Cocos en cuanto a su conformación bentónica puede ser explicado por la alta presencia de TAS, FMA y OINV, mientras que 40 Cañones tuvo la más alta presencia de TAM, y las otras localidades tuvieron estuvieron más representadas por PEYS. En general, todos los sitios se caracterizaron por presentar muy baja cobertura de coral vivo, Invertebrados agresivos, CYAN y motile.

Se registraron 28 especies de coral hermatípico en toda la zona de muestreo. Resaltaron en la composición arrecifal tres de ellas, abarcando en conjunto el 57.4 % del promedio total: *Agaricia agaricites* (AAGA) con un rango de aparición por sitio entre 12.1 % y 51.7 %, con un promedio de 29.66 % de la composición coralina total, *Porites asteroides* (PAST) con un rango de aparición por sitio del 7.1 % al 32.5 %, con un promedio de 12.9 % de dicha composición coralina total, y *Siderastrea siderea* (SSID) con un rango de aparición por sitio del 1.7 % al 65 %, con un promedio de 14.84 % de la composición coralina (Fig. 3a). En cuanto al análisis de MDS y al cluster de la composición coralina no se observó un patrón claro de agrupamiento de los sitios (Fig. 3b; 3c).

a)



b)



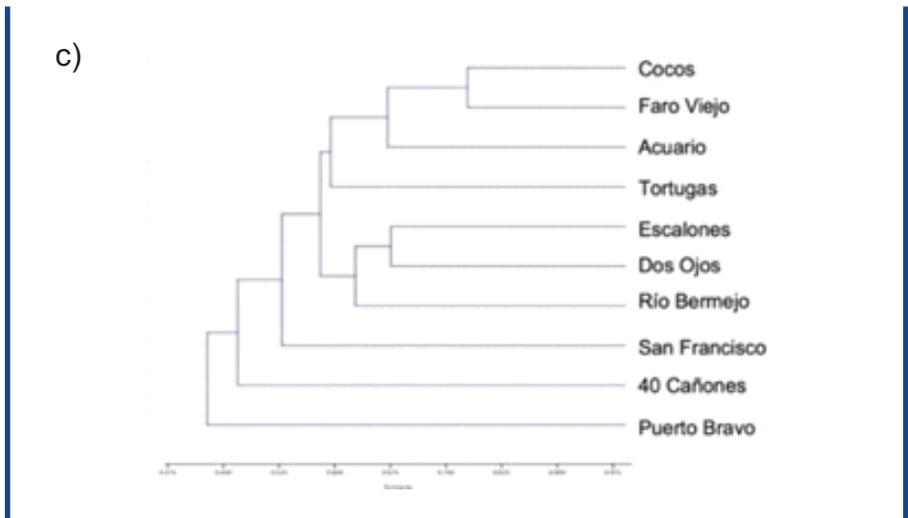


Figura 3. a) Composición de las especies de coral por sitio. Donde: UNK (desconocidas), SBOU (*Solenastrea bournoni*) SINT (*Stephanocoenia intersepta*), SSID (*Siderastrea siderea*), SRAD (*Siderastrea radians*), PSTR (*Pseudodiploria strigosa*), PPOR (*Porites porites*), PFUR (*Porites furcata*), PDIV (*Porites divaricata*), PAST (*Porites astreoides*), ORBI (Orbicellas), OFRA (*Orbicella franksi*), OFAV (*Orbicella faveolata*), OANN (*Orbicella annularis*), MLAM (*Mycetophyllia lamarckiana*), MCAV (*Montastrea cavernosa*), MILL (*Millepora* sp.), MALC (*Millepora alcicornis*), MARE (*Manicina areolata*), MFOR (*Madracis formosa*), MDEC (*Madracis decactis*), FFRA (*Favia fragum*), DLAB (*Diploria labyrinthiformis*), ATEN (*Agaricia tenuifolia*), AHUM (*Agaricia humilis*), AAGA (*Agaricia agaricites*), APAL (*Acropora palmata*) y ACER (*Acropora cervicornis*). b) y c) Los resultados que se generaron con los datos transformados no muestran algún agrupamiento en función de la cobertura de coral. El sitio que presentó menor similitud fue Puerto Bravo.

La biomasa de peces herbívoros (BPH) varió entre 687 y 3,504 g/100 m², con un promedio de 1,746.6 g/100 m². Los sitios de Acuario (2,139 g/100 m²), 40 Cañones (3,504 g/100 m²) y Dos Ojos (2,406 g/100 m²), presentaron los valores más altos. Por otro lado, la biomasa de peces carnívoros (BPC) mostró una mayor variabilidad con valores entre 194 y 15,641 g/100 m². Los sitios de Faro Viejo (6,646 g/100 m²) y 40 Cañones (15,641 g/100 m²) destacaron por sus altas BPC, atribuidas principalmente a la abundancia de pargos (familia Lutjanidae: 6,379 g/100 m²), y meros (familia Serranidae: 15,418 g/100 m²) respectivamente. En particular el mero negro *Mycteroperca bonaci* fue el principal contribuyente a la BPC en 40 Cañones (15,270 g/100 m²) (Fig. 4).

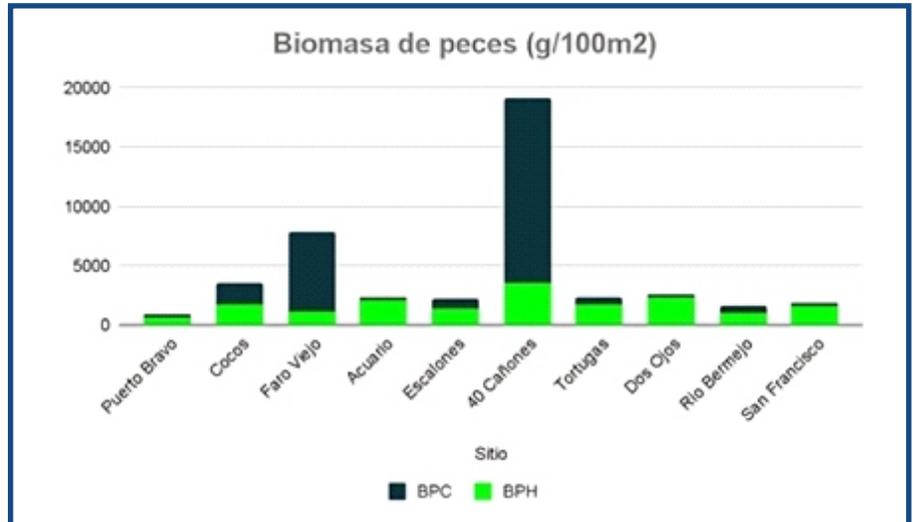


Figura 4. Biomasa de peces por sitio: BPH (biomasa de peces herbívoros) y BPC (biomasa de peces comerciales).

El índice de salud arrecifal (ISA) osciló entre 1 y 3.75, siendo el más bajo en Puerto Bravo (1) y el más alto en 40 Cañones (3.75), dando un promedio de 2.6 para Mahahual (fig.5).

SITIO	%LC	%FMA	BPH g/m2	BPC g/m2	ISA
Puerto bravo	3.33	31.2	687	234	1
Cocos	6.83	18.2	1799	1772	3
Faro Viejo	9.67	5.9	1195	6646	3.25
Acuario	10.41	18	2139	194	2.5
Escalones	12.17	14.3	1354	937	2.75
40 Cañones	7.5	20.3	3504	15641	3.75
Tortugas	11.83	17.2	1782	625	2.5
Dos Ojos	9.67	7.8	2406	233	2.5
Río Bermejo	11.67	17.3	996	592	2.5
San Francisco	9.67	10.4	1604	322	2.25
Mahahual (Promedio)	9	16	1747	2720	2.6

Figura 5. Estimadores principales por sitio y promedio para Mahahual: cobertura de coral vivo (%LC), macroalgas carnosas (%FMA), biomasa de peces herbívoros (BPH), biomasa de peces comerciales (BPC) e Índice de Salud Arrecifal (ISA) por sitio y para la localidad de Mahahual. El color rojo representa un estado crítico, el naranja malo, el amarillo regular, el verde bien y el azul muy bien de acuerdo con la categorización de la iniciativa de Arrecifes Saludables para Gente Saludable.

► DISCUSIÓN

El porcentaje de cobertura de corales vivos (%LC) resultante en este estudio (promedio igual a 9.27 %; Fig. 3) es menor al de todas las subregiones evaluadas recientemente en el Arrecife Mesoamericano con la misma metodología de muestreo y estimación, 19 % en promedio para la evaluación realizada en el 2021 y 17 % para la del 2023 (McField et al., 2022 y 2024, respectivamente) y a lo reportado de manera general para los parches arrecifales del Caribe Mexicano con ésta y otras metodologías, entre el 11 y 20 % (Rioja-Nieto y Alvarez-Filip 2018; Suchley y Alvarez-Filip 2018, McField et al., 2022).

La subregión sur del Caribe mexicano donde se encuentra Mahahual ha presentado una importante pérdida de cobertura coralina (Contreras-Silva et al., 2020) que sigue ocurriendo en años recientes de acuerdo a los últimos reportes de la Iniciativa de Arrecifes Saludables para Gente saludable (18 % en el 2018, 14 % en el 2020, 11 % en 2022 y 12 % en 2024). Al comparar nuestros resultados con estudios previos realizados en Mahahual se tiene que, anteriormente, el %LC era mayor; 25 % de acuerdo con Garza-Pérez y Arias-González (2001) y 17 % de acuerdo a lo reportado por Ruíz-Zárte y colaboradores (2003), también se han encontrado bajos niveles en evaluaciones más recientes, concordante con nuestros resultados (menor al 10 % en Arias-González et al., 2017), incluso en zonas aledañas (8.2 ± 5.1 %; Figueroa-Zavala et al., 2015).

Diversos factores han contribuido a la pérdida de cobertura coralina en el Caribe de México tales como el grado, tiempo y adecuada protección de un área (Figueroa-Zavala et al., 2015; Suchley y Alvarez-Filip 2018; Rioja-Nieto y Alvarez-Filip, 2018; Díaz-Osorio et al. 2022), lo que en gran parte puede explicar el bajo nivel para este parámetro obtenido en Mahahual, una localidad que hasta el 2016 carecía de alguna denominación como ANP y que ha carecido de evaluación y vigilancia en el cumplimiento de legislación ambiental para acciones que, directa e indirectamente afectan al arrecife, tales como la pesca no sustentable de especies clave para la salud arrecifal como invertebrados herbívoros, principalmente cangrejo rey y langostas que suelen atraparse muy cerca del arrecife.



Además de esto, la baja cobertura coralina puede explicarse por el desarrollo costero descontrolado en general en el Caribe de México (Suchley y Alvarez-Fillip, 2018), y que en Mahahual se ha asociado particularmente a la construcción de un muelle de cruceros que fomenta el incremento de turistas y desarrollo de infraestructura (Arias-González et al., 2017), así como la destrucción de manglares en la localidad (Hirales-Cota et al., 2010), siendo estos ecosistemas clave para el buen funcionamiento de los arrecifes (Mumby et al., 2004).

Los arrecifes de Mahahual se vieron seriamente afectados desde el 2000 cuando se construyó un puerto para cruceros turísticos, para lo que fue necesario el dragado del arrecife y hubo como consecuencia, entre otras cosas, el levantamiento de mucho sedimento. Posteriormente, se construyó un barrio residencial para alojar a los trabajadores, destruyendo hectáreas de manglar. Actualmente, los cruceros siguen teniendo afectaciones directas a la biodiversidad de la localidad como contaminación acústica. En Mahahual, también es visible la erosión de las playas, causada en parte por la construcción de un malecón muy cerca del mar, lo que corta o impide el flujo hídrico entre manglar y arrecife que en Mahahual está muy cerca de la costa, lo cual lo hace muy sensible a los cambios en ecosistemas asociados, contaminación, exceso de nutrientes y sedimentación, etc.

Es necesario también recalcar que la calidad del agua que llega a los arrecifes ya se ha reportado como una de las principales causas de su deterioro. En todo el SAM, ya se ha reportado la existencia alarmante de patógenos provenientes de aguas residuales humanas, lo que contradice lo establecido por convenios internacionales (McField et al., 2024), y varios sitios del Caribe Mexicano han sido señalados por no cumplir con los criterios establecidos por la normatividad ecológica mexicana, incluyendo puntos de muestreo en Mahahual (Camacho-Cruz et al., 2024).

Un “arrecife saludable” se caracteriza por tener un porcentaje más alto de cobertura de corales vivos en relación con el porcentaje de cobertura de macroalgas (Gutiérrez, 2016; Steneck y Sala 2005). Sin embargo, muchos arrecifes de coral se han degradado en las últimas décadas



debido a una combinación de perturbaciones naturales y antropogénicas, estas perturbaciones pueden causar el reemplazo de especies dominantes por otras, a este proceso se le denomina cambio de fase (Hughes, 1994; Arias-González et al. 2017). De acuerdo con Arias-González et al., (2017) este proceso empezó en la localidad de Mahahual hace aproximadamente 20 años, lo cual coincide con en este estudio donde se encontró mayor cobertura algal (%FMA 16.6) que de corales (%LC 9.2). Diversos estudios han mostrado que la región del Caribe ha sufrido cambio de fase coral-alga más severo que en otras regiones (Pandolfi et al. 2003; Bellwod et al. 2004; Bruno et al 2009).

Además del bajo porcentaje de cobertura coralina es importante considerar que en seis de los diez sitios evaluados predominaron las Agaricias (Fig. 2), resultando un promedio de 29.66 % de la composición coralina total, resultados similares han sido reportados en ambientes arrecifales perturbados sometidos a presiones ambientales como material suspendido por corrientes prevalecientes, fuerte oleaje y ciclones en otras localidades del Caribe (Fonseca et al., 2006; Chavez et al., 2007; Chávez-Hidalgo, 2009).

En cuanto a la biomasa de peces herbívoros (BPH), nuestros sitios tuvieron un promedio de 1,746.6 g/100 m², inferior al promedio para el Caribe de México (2656 g/100 m²; McField et al., 2024) estimado mediante la misma metodología utilizada en este estudio. En el año 2010 en Mahahual la BPH se estimó en aproximadamente 3,000 g/100 m² (Arias et al., 2017), se utilizó otra metodología de muestreo y estimación, sin embargo, puede implicar que se ha perdido casi la mitad de la BPH en la localidad lo que contribuye a la alta cobertura de macroalgas encontrada en este estudio y la pérdida de cobertura coralina.

El bajo nivel de conservación de los parches arrecifales también está relacionado a la explotación pesquera en el caso particular de Mahahual, el no pertenecer a una ANP por décadas puede ocasionar que sea un sitio con alto nivel de pesca (Arias-González et al., 2004), lo que explicaría que seis de los diez sitios muestreados se encuentren en estado de crítico a regular y que sólo tres hayan presentado niveles altos de BPC (Fig. 5).



Sin embargo, existió una amplia variabilidad para este parámetro entre los diez sitios evaluados (Fig. 5), y el alto valor promedio resultante ($2,720 \text{ g}/100 \text{ m}^2$) se debe principalmente a 3 de los 10 sitios, principalmente el sitio de 40 Cañones, que tuvo un valor muy alto de BPC (mayor a $15,641 \text{ g}/100 \text{ m}^2$), cinco veces mayor que Cozumel ($2,663 \text{ g}/100 \text{ m}^2$), subregión de México con los valores más altos reportados en el SAM desde 2018 (McField et al., 2024; 2022; 2020 y 2018).

La pesca asociada a invertebrados marinos como langosta, caracol y cangrejo rey, son también importantes a considerar para determinar la sostenibilidad de la pesca en Mahahual. Los bajos valores encontrados en este estudio para la presencia de invertebrados móviles (0.015 individuos por m^2 en promedio) son congruentes con estudios previos (Rodríguez, 2017).

Considerando los cuatro parámetros principales evaluados: %LC, %FMA, BPH y BPC, los arrecifes de Mahahual tuvieron un índice de salud arrecifal (ISA) promedio de 2.6, lo que sitúa a esta localidad por debajo del promedio reportado para el Caribe Mexicano en el 2022 y 2024 (2.8 en ambos; McField et al., 2022 y 2024), lo que indica un grado de deterioro importante del ecosistema arrecifal en esta localidad. Sin embargo, no se observó un patrón claro de agrupamiento entre las localidades en cuanto a la composición bentónica y cobertura de coral, que señale los sitios más degradados o más conservados y que estén relacionados a las actividades turísticas o pesqueras en particular, siendo relevante el bajo %LC en todos los sitios (figura 2a).

Este estudio representa la evaluación más reciente de los arrecifes de Mahahual y la que ha abarcado el mayor número de sitios mediante el protocolo de AGRRA que utiliza el método de transecto de punto intercepto para las estimaciones del bentos, el cual se ha comprobado que proporciona un nivel de información casi equivalente a otros métodos, como el de intercepto de línea, y con menor consumo de tiempo bajo el agua, por lo que es altamente recomendable utilizar el protocolo AGRRA para evaluar la salud del arrecife (Facon et al., 2016), ya que es un protocolo calibrado de recopilación de datos. Esto permitió analizar con detalle el estado de conservación del arrecife y compararlo con los resultados obtenidos en otras localidades del SAM y subregiones de



México, especialmente aquellas donde se ha aplicado la misma metodología, lo que asegura la validez, confiabilidad y reproducibilidad del conocimiento generado (Jackson et al., 2014).

Además, este estudio marca el inicio de una serie de evaluaciones dirigidas a comprender los cambios a lo largo del tiempo y el impacto a largo plazo de las estrategias de conservación en los arrecifes de Mahahual. En general, estos arrecifes muestran un alto grado de deterioro ecológico, evidenciado en la composición del bentos, dominado principalmente por TAS, PEYS y FMA (Fig. 2), con una baja presencia de corales hermatípicos y de invertebrados móviles como erizos, caracoles y langostas, organismos característicos de arrecifes saludables, por lo que es imprescindible realizar estudios más localizados y detallados como el presente trabajo sobre la salud del arrecife que permitan detectar las problemáticas locales y poder implementar acciones de gestión local para conservación y recuperación del arrecife en Mahahual.

El manejo local efectivo ayuda a mejorar la sobrevivencia de especies en los arrecifes de coral, y mejora su recuperación después de eventos que los perturban como olas de calor intensas (Donoval et al., 2021; Walker et al., 2024). Existen numerosas acciones que llevadas a cabo en el corto, mediano y largo plazo pueden contribuir a una mejoría ambiental de los arrecifes de coral en Mahahual. En particular, hacemos énfasis en acciones agrupadas en cuatro ejes: investigación, educación, restauración ecosistémica y una gestión costera integrada que incluya trabajar con el sector público y privado.

En Mahahual falta conocimiento de datos clave para un mejor manejo de sus arrecifes, entre ellos es necesario cuantificar con regularidad la calidad de agua que llega al arrecife desde la costa, considerado que la contaminación por descargas residuales es uno de los principales estresores en los arrecifes de coral (Wear y Thurberg, 2015).

Otros puntos fundamentales de investigación deben basarse en la obtención de datos de pesca realizada en la localidad, donde se desarrolla la captura de especies clave para la salud del arrecife como meros, cangrejo rey, langosta y caracol. Recabar datos de tallas, temporadas de reproducción y sitios de agregación, son importantes



para una mejor gestión.

También debe determinarse cuidadosamente la capacidad de carga turística. En Mahahual el INEGI registró 920 pobladores en 2010 y 2,636 en 2020, lo que implica que casi triplicó su población en 10 años, número que incrementa al considerar la población fluctuante y no cuantificada incluyendo turistas que llegan principalmente mediante el arribo de pasajeros en el puerto de cruceros que se encuentra entre los tres puertos que más personas reciben en todo México (SECTUR, 2014-2022), con una cifra relevante en 2018 y 2019, al recibir más de un millón de pasajeros cada año.

Asimismo, son necesarias campañas efectivas de concientización y capacitación en las que participen actores de la sociedad civil, pero también autoridades ambientales, alcaldía y sector privado. La educación ambiental, que aunque existe en la localidad enfocada a escuelas y niños, debe fortalecerse con diversos actores clave, entre ellos, es necesario que los dueños y administradores de restaurantes se comprometan a conocer y respetar las reglas ambientales establecidas en cuanto a la obtención de sus productos. De acuerdo a los pescadores locales, son ellos los que solicitan especies como langosta y mero, aún en época de veda, y se niegan a comprar otras especies que están en menor riesgo de desaparecer debido a que no los consideran de buena calidad. Esta concientización ambiental también debe aplicarse hacia los turistas ya que es común observar que todos ellos incursionan en prácticas dañinas para el arrecife como la utilización de bloqueador solar, lo que ya se ha documentado como un estresor a los arrecifes de coral (Casas-Beltrán et al. 2021) y que en la localidad incrementa su impacto considerando el gran número de visitantes temporales ya mencionado.

En cuanto a la restauración ecosistémica, ésta se ha determinado como un componente clave en la conservación y recuperación de los recursos naturales (Aronson y Alexander, 2013; Duarte, et al. 2020). En la localidad de Mahahual ya se está llevando a cabo un programa de restauración de corales por parte de científicos de asociaciones civiles y sector académico, en conjunto con las autoridades ambientales, lo que a largo plazo pretende recuperar la estructura y biodiversidad en algunos



parches arrecifales, mediante la implementación de acciones, entre las que cabe mencionar, reproducción sexual y asexual de corales en peligro de extinción. Este programa deberá incrementar el área restaurada e incluir la restauración de ecosistemas asociados como manglares y dunas costeras, además de lograr una mayor participación ciudadana y del gobierno local.

En cuanto a cuestiones de gestión, recomendamos se atienda de manera prioritaria la mala calidad del agua que en Mahahual llega al arrecife, esto está relacionado, entre otros factores con el desarrollo costero y falta de infraestructura adecuada para el tratamiento de aguas negras, lo cual tiene como consecuencia la sobrecarga del sistema y el desborde de las aguas contaminadas en las calles y eventualmente al mar. Esto se ha visto reflejado en el deterioro del arrecife (Arias-González et al., 2017), lo que urge a que el desarrollo urbano y turístico en Mahahual venga acompañado de medidas para que quede asegurado el tratamiento adecuado de las descargas residuales.

Se deben incrementar los esfuerzos de manejo y conservación que incluyan manejo de aguas residuales y regulación del desarrollo costero para minimizar las amenazas que enfrentan los arrecifes de esta localidad (Suchley y Alvarez-Filip, 2018). Esto se puede hacer mediante una inversión pública que asegure una mayor capacidad de tratamiento, tomando en cuenta el crecimiento poblacional y el arribo masivo de turistas. También se recomienda la separación de los sistemas de recuperación de aguas pluviales del sistema de tratamiento de aguas negras, las cuales saturan la planta de tratamiento cuando hay fuertes lluvias. Recomendamos que cada establecimiento privado reciba la información adecuada y sea vigilado en cuanto a su obligación de hacer un mantenimiento adecuado de su desagüe, o que se empiece a utilizar sistemas particulares como biodigestores.

La gestión ambiental integrada propone un proceso integral que incluye acciones a nivel ecosistémico pero también sociales, económicas, de gobernanza y de desarrollo. El conjunto de estrategias y acciones es lo que da al enfoque integral su habilidad de solucionar las problemáticas relacionadas al deterioro del arrecife desde su origen.



Las acciones sugeridas en este estudio permitirían que los arrecifes de Mahahual mejoren en beneficio a la comunidad que se sustenta de este ecosistema y de especies en grave peligro de extinción que lo habitan como los corales cuerno de alce (*Acropora palmata*) y ciervo (*Acropora cervicornis*), tortuga verde (*Chelonia mydas*), caguama (*Caretta caretta*) y carey (*Eretmochelys imbricata*), tiburón martillo gigante (*Sphyrna mokarran*), caracol rosado (*Strombus gigas*), entre otras.

► AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a Andrea Rivera-Sosa y Olivia Moudy por su participación en el monitoreo, al centro de buceo Takata Experience por proporcionar equipo de buceo, lancha y personal necesario para la realización de los muestreos. Al equipo de Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment, y a los miembros y monitores voluntarios de la Iniciativa Arrecifes Saludables para Gente Saludable por proporcionarnos los datos del 2021, capacitación y procesamiento de los datos de este estudio. Particularmente, agradecemos a Melina Soto por su asesoría y apoyo, así como a Israel Muñoz-Castillo por las correcciones y sugerencias en el escrito.

► LITERATURA CITADA

- Aguilar, D. (1998).** Estructura de la comunidad bentónica del arrecife de Mahahual, Quintana Roo, México (*No. Q/593.6097267 A3*).
- AGRRA. (2018)** Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment: coral reef monitoring. Disponible en <http://www.agrra.org>.
- Alvarado, J., Reyes-Bonilla, H., & Benítez-Villalobos, F. (2015).** *Diadema mexicanum*, erizo de mar clave en los arrecifes coralinos del Pacífico Tropical Oriental: lo que sabemos y perspectivas futuras (Diadematoida: Diadematidae). *Revista de Biología Tropical*, 63, 135-157.



- Álvarez-Filip L, Estrada-Saldívar N, Pérez-Cervantes E, Molina-Hernández A. y González-Barrios, F. (2019).** A rapid spread of the stony coral tissue loss disease outbreak in the Mexican Caribbean. *PeerJ*:e8069.
- Alvarez, R. y Wong, K. (2015).** Sistema Arrecifal Mesoamericano: Construyendo Futuro desde Tulum 1997. *Fondo SAM (MAR FUND)*.
- Andrade, N. (2018).** Cambios en la comunidad de peces arrecifales del caribe mexicano como medida para evaluar la efectividad de áreas marinas protegidas. *Tesis de Maestría*. Universidad Autónoma de Baja California Sur.
- Arias-González, J., Nuñez-Lara, E., González-Salas, C. y Galzin, R. (2004).** Trophic models for investigation of fishing effect on coral reef ecosystems. *Ecological modeling*, 172(2-4), 197-212.
- Arias-González, J., Fung, T., Seymour, R., Garza-Pérez, J., Acosta-González, G. y Bozec Y. (2017).** *Changes in herbivorous fish abundance do not drive a coral-algal phase shift in Mesoamerica. PLoS ONE 12(4): e0174855. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174855>.*
- Arguelles, J., Brenner, J. y Pérez-España, H. (2019).** Línea base para el monitoreo de los arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano (PNSAV) a través de la metodología AGRRA (Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment). *The Nature Conservancy – Sea&Reef. Boca del Rio*, 26 pp. DOI: [10.13140/RG.2.2.35372.92807](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35372.92807).
- Aronson, J., y Alexander, S. (2013).** Ecosystem restoration is now a global priority: time to roll up our sleeves. *Restoration Ecology* 21(3):293-296. <http://dx.doi.org/10.1111/rec.12011>
- Baker, P., Gabrielatos, C. y McEnery, T. (2013).** Sketching Muslims: A Corpus Driven Analysis of Representations around the word 'Muslim' in the British Press 1998-2009. *Applied Linguistics*, 34 (3), 255-278.
- Barón, M. (2017).** La restauración de arrecifes de coral; una alternativa de conservación en el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM).
- Barranco, H. y Morín, J. (2010).** Áreas Naturales Protegidas. *Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán*, 414-419.



- Bellwood, D., Hughes, C. y Nystro, M. (2004).** Confronting the coral reef crisis. *Nature* 429:827–833.
- Bruno, J., Sweatman, H., Precht, W., Selig, E. y Schutte, V. (2009).** Assessing evidence of phase shifts from coral to macroalgal dominance on coral reefs. *Ecology*, 90: 1478-1484. <https://doi.org/10.1890/08-1781.1>.
- Calderón, L., Bonilla, H., López, C. y Pérez, R. (2017).** Los arrecifes coralinos de México: servicios ambientales y secuestro de carbono. *Elementos para Políticas Públicas*, 1(1), 53-62.
- Camacho-Cruz, K., Ortiz-Hernández, M., Carrillo, L., y Sánchez, A. (2024).** Variability of the trophic state in a coastal reef system associated with submarine groundwater discharge in the Mexican Caribbean. *Environmental Science and Pollution Research*, 1-20.
- Can, A. (2003).** Manejo integrado de recursos costeros en Mahahual reporte final periodo octubre-2002-septiembre-2003. 42p.
- Casas-Beltrán, D., Febles-Moreno, K., Hernandez-Yac, E., Gallaher, C., Alvarado-Flores, J., Leal-Bautista, R., & Lenczewski, M. (2021).** Impact of tourist behavior on the discharge of sunscreen contamination in aquatic parks, sinkholes, and beaches of the Mexican Caribbean. *applied sciences*, 11(15), 6882.
- Chávez-Hidalgo, A. (2009).** Conectividad de los arrecifes coralinos del Golfo de México y Caribe Mexicano. *Tesis de Maestría en Ciencias*. Instituto Politécnico Nacional, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas. La Paz. B.C.S., México. 170p.
- Contreras-Silva, A., Tilstra, A., Migani, V., Thiel, A., Pérez, E., Estrada, N., & Wild, C. (2020).** A meta-analysis to assess long-term spatiotemporal changes of benthic coral and macroalgae cover in the Mexican Caribbean. *Scientific reports*, 10(1), 1-12.
- Daltabuit Godás, M. (1999).** Desarrollo turístico en Quintana Roo y sus efectos en el sistema arrecifal mesoamericano y del Caribe. 22 Pp. *En: IX Reunión Anual del Programa*.



- De Alba, C. (2020).** Efecto del huracán Dean en la variación del ensamblaje de coral hermatípico en áreas someras y profundas de Banco Chinchorro, México. *Tesis de Maestría*. Centro Universitario de Ciencias Biológicas y Agropecuarias. Universidad de Guadalajara.
- Díaz-Pérez, L., Rodríguez-Zaragoza, F., Ortiz, M., Cupul-Magaña, A., Carriquiry, J., Ríos-Jara, E., Rodríguez-Troncoso, A. y García-Rivas, M. (2016).** Coral reef health indices versus the biological, ecological, and functional diversity of fish and coral assemblages in the Caribbean Sea. *PloSone*, *11*(8), e0161812.
- Díaz-Osorio, A., Schmitter-Soto, J., Vega-Zepeda, A. y Espinoza-Tenorio, A. (2022).** How effective are marine parks in protecting their coral reef ecosystem? A study case in the Mexican Caribbean. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, *32*(7), 1126-1140.
- Donoval, M., Burkepile, D., Kratochwill, C., Shlesinger, T., Sully, S., Oliver, T., y Van Woesik, R. (2021).** Local conditions magnify coral loss after marine heatwaves. *Science*, *372*(6545), 977-980.
- Duarte, C., Agusti, S., Barbier, E., Britten, G., Castilla, J., Gattuso, J., y Worm, B. (2020).** Rebuilding marine life. *Nature*, *580*(7801), 39-51.
- Escalante, M. y Carrol, I. (2013).** Antropología y turismo. Cuicuilco, *20*(56), 249-259. ISSN: 1405-7778. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=35128956012>.
- Facon, M., Pinault, M., Obura, D., Pioch, S., Pothin, K., Bigot, L., Garnier, R., Quod, Jean-Pascal. (2016).** A comparative study of the accuracy and effectiveness of Line and Point Intercept Transect methods for coral reef monitoring in the southwestern Indian Ocean islands. *Ecological Indicators*, *60*, 1045-155. 10.1016/j.ecolind.2015.09.005.
- Feingold, J., Thornton, S., Banks, K., Gasman, N., Gilliam, D., Fletcher, P. y Avila, C. (2003).** A rapid assessment of coral reefs near Hopetown, Abaco Islands, Bahamas (stony corals and algae). pp. 58-75 in *J.C. Lang (ed.), Status of Coral Reefs in the western Atlantic: Results of initial Surveys, Atlantic and Gulf Rapid Reef Assessment (AGRRA) Program. Atoll Research Bulletin 496.*



- Figuroa-Zavala, B., Correa-Sandoval, J., Ruiz-Zárata, M., Weissenberger, H. y González-Solís, D. (2015).** Environmental and socioeconomic assessment of a poorly known coastal section in the southern Mexican Caribbean. *Ocean & Coastal Management*, 110, 25-37.
- Garza-Pérez, J. y Arias-González, J. (2001).** Temporal change of a coral reef community in the south Mexican Caribbean. *Proceedings of the 52nd Gulf and Caribbean Fisheries Institute*.
- Gutiérrez, A., Torruco, D., Fraga, J. y Solís, G. (2013).** Participación ciudadana en la conservación de arrecifes coralinos en dos áreas protegidas del Sistema Arrecifal Mesoamericano: un análisis contingente. *Investigación Ambiental*, 5, 5-15.
- Gutierrez, D. (2016).** Evaluación de reclutamiento de coral en el arrecife de Mahahual; como indicador de recuperación. *Tesis de licenciatura*. Universidad de Quintana Roo. Chetumal.
- Hammer, O., Harper, D.A.T. y Ryan, P.D. (2001).** PAST. Paleontological Statistics software package for education and data analysis. *Paleontologia Electrónica* 4(1):9p.
- Hirales, M., Espinoza, J., Schmook, B., Ruiz, A. y Ramos, R. (2010)** Agentes de deforestación de manglar en Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, sureste de México. *Ciencias Marinas*. 36(2): 147–159p.
- Hughes, T. (1994).** Catastrophes, phase shifts, and large-scale degradation of a Caribbean coral reef. *Science*.265(5178):1547-51. doi: 10.1126/science.265.5178.1547. PMID: 17801530.
- Jackson, J., Donovan, M., Cramer K., Lam. V. (editors). (2014)** Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970-2012. Global Coral Reef Monitoring Network, IUCN, Gland, Switzerland.
- Kramer, P., McField, F., Álvarez, I. Drysdale, F., Rueda, A. y Pott, R. (2015).** Report card for the Mesoamerican Reef. Disponible en www.healthyreefs.org
- Lang, J., Marks, K., Kramer, P., Kramer, P. y Ginsburg, R. (2012).** Protocolos AGRRA version 5.5.



- López, H. (2011).** Aprovechamiento turístico y manejo de arrecifes de coral en Mahahual, Quintana Roo. *Tesis de licenciatura*. Universidad de Quintana Roo. Chetumal.
- Marks, K. (2008).** AGRRA Parametrized Online Reporting Tool. *AGRRA-PORT. Version 1.1 pp. 30.*
- McField, M. y Kramer, P. (2007).** Healthy Reefs for Healthy People: A guide to indicators of Reef Health and Social well-being in the Mesoamerican Reef Region. With contributions by M. Gorrez and M. McPherson. 208 pp. *Washington, Smithsonian Press.*
- McField, M., Kramer, P., Alvares-Phillip, L., Drysdale, I., Rueda, M., Giro, A. y Soto, M. (2018).** Report Card for the Mesoamerican Reef. Healthy Reef Initiative. www.healthyreefs.org.
- McField, M., Kramer, P., Petersen, A., Soto, M., Drysdale, I., Craig, N. y Rueda, M. (2020).** Mesoamerican Reef Report Card.
- McField, M., Soto, M., Craig, N., Giro, A., Drysdale, I., Guerrero, C., Rueda, M., Kramer, P. y Muñiz, I. (2022).** Mesoamerican Reef Report Card. Healthy Reef Initiative. www.healthyreefs.org.
- McField, M., Soto, M., Martínez, R., Giró A., Guerrero C., Rueda, M., Kramer, P., Roth L., y Muñiz, I. (2024).** Mesoamerican Reef Report Card. Healthy Reefs Initiative. www.healthyreefs.org.
- Mumby, P., Edwards, A. y Arias-González, E. (2004).** Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature* 427, 533–536 <https://doi.org/10.1038/nature02286>.
- Pandolfi, J., Bradbury, E., Sala, T., Hughes, K., Bjorndal, R., Cooke, D., McArdle, L., McClenachan, M., Newman, G., Paredes, R. y Jackson, J. (2003).** Global trajectories of the long-term decline of coral reef ecosystems. *Science*.
- Rioja-Nieto, R. y Alvarez-Filip, L. (2019).** Coral reef systems of the Mexican Caribbean: Status, recent trends, and conservation. *Marine Pollution Bulletin*, 140, 616-625.



- Rodríguez, A. (2017).** Estudios de Límite de Cambio Aceptable, para regular las actividades turístico recreativas que se desarrollan en Mahahual-Xahuayxol, en la Reserva de la Biosfera Caribe Mexicano. *PROZONA*. Convenio de Concertación Núm. CONANP/PROMANP/FOR/005/2017.
- Rodríguez, M. (2019).** Perspectiva socioeconómica de Área Marina Protegida, enfocada en arrecifes de coral en Mahahual, Quintana Roo *Tesis de Licenciatura*. Universidad Nacional Autónoma de México. Repositorio Tesis UNAM Digital.
- Ruiz-Zárate, M., Hernández-Landa, R., González-Salas, C., Nuñez-Lara, E. y Arias-Gonzalez, J. (2003).** Mexico. Condition of Coral Reef Ecosystems in Central-Southern Quintana Roo, Mexico (Part 1: Stony Corals and Algae). *Atoll Research Bulletin*.
- SECTUR (2022) Análisis del arribo de cruceros 2018 - 2021 y expectativas 2022. DATATUR. Secretaria de turismo. Recuperado de : https://www.datatur.sectur.gob.mx/Documentos%20compartidos/Analisis_Turismo_Cruceros.PDF
- Steneck, R. y Sala, E. (2005).** Large marine carnivores: trophic cascades and top-down controls in coastal ecosystems past and present. pp. 110–137 in J. C. Ray, K. H. Redford, R. Steneck, and J. Berger, editors. Large carnivores and the conservation of biodiversity. *Island Press, Washington, D.C., USA*.
- Suchley, A. y Alvarez-Filip, L. (2018).** Local human activities limit marine protection efficacy on Caribbean coral reefs. *Conservation Letters*, 11(5), e12571.
- Toledo, V. (2005).** Repensar la conservación: ¿ áreas naturales protegidas o estrategia bioregional?. *Gaceta ecológica*, (77), 67-83.
- Veron, J. (2000).** Corals of the World, Townsville, *Australian Institute of Marine Science*.
- Walker, A., Kratochwill, C., y Van Woesik, R. (2024).** Past disturbances and local conditions influence the recovery rates of coral reefs. *Global Change Biology*, 30(1), e17112.



Wear, S., y Thurber, R. (2015). The Year in Ecology and Conservation Biology. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1355(1), 15.

WWF (1999). Arrecife Mesoamericano. Recuperado el 15/02/2023 de: https://www.wwf.org.mx/que_hacemos/programas/arrecife_mesoamericano/



Riesgo a la salud humana por el contenido de níquel en pescados y mariscos

Risk to human health due to nickel content in fish and shellfish



1. Nancy Lorena Garzón-Raygoza



0000-0003-1318-9319

Doctorado en Ciencias en Recursos Acuáticos, Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa. Paseo Claussen s/n, colonia centro, C,P, 82000, Mazatlán, Sinaloa, México.

Autor de correspondencia: nancy_facimar@uas.edu.mx



2. Marisela Aguilar-Juárez



0000-0003-0268-5522

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, CP 82000. México



3. Carolina Bojórquez-Sánchez



0000-0002-3371-059X

Universidad Politécnica de Sinaloa. Carretera Municipal Libre Mazatlán Higuera Km 3, Mazatlán, Sinaloa, CP 82199. México.



4. Carmen Cristina Osuna-Martínez



0000-0003-4934-5790

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa, CP 82000. México



5. Magdalena Elizabeth Bérques-Tiznado



0000-0002-3993-763X

Universidad Politécnica de Sinaloa. Carretera Municipal Libre Mazatlán Higuera Km 3, Mazatlán, Sinaloa, CP 82199. México.



6. Ofelia Escobar-Sánchez



0000-0002-7841-0080

Facultad de Ciencias del Mar Universidad Autónoma de Sinaloa. Paseo Claussen s/n, colonia Centro, Mazatlán, Sinaloa, CP 82000. México e "Investigadoras e Investigadores por México" SECIHTI, Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación. Av. Insurgentes Sur 1582, Col., Crédito Constructor, Demarcación Territorial Benito Juárez. Ciudad de México, C.P. 03940, México".



7. Carolina Guadalupe Delgado-Alvarez



0000-0003-0787-9997

Universidad Politécnica de Sinaloa. Carretera Municipal Libre Mazatlán Higuera Km 3, Mazatlán, Sinaloa, CP 82199. México.



latindex



CREATIVE COMMONS



OPEN ACCESS

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el origina



Riesgo a la salud humana por el contenido de níquel en pescados y mariscos

Risk to human health due to nickel content in fish and shellfish

▶ RESUMEN

El níquel es un elemento potencialmente tóxico para el ser humano y su principal fuente de exposición son los alimentos, entre ellos los vegetales, pescados y mariscos. Este metal es liberado al medio ambiente por fuentes naturales y antropogénicas, por lo general, sus componentes se dispersan en los ecosistemas y se absorben sobre los sedimentos o partículas del suelo, pudiendo llegar a los cuerpos de agua por medio de escorrentías. Asimismo puede incidir en los humanos mediante los alimentos. Los antecedentes en cuanto al riesgo en la salud sobre el níquel son muy escasos, es por eso la importancia de conocer la biodisponibilidad de este elemento. Por lo tanto, se deben hacer más estudios sobre este elemento en los alimentos, dada su relación directa con su toxicidad a los seres humanos.

Palabras claves: alimentación, biodisponibilidad, riesgo toxicológico.

▶ ABSTRACT

Nickel is a potentially toxic element for humans, and its main source of exposure is food, including vegetables, fish and seafood. This metal is released into the environment by natural and anthropogenic sources. Generally, its components are dispersed in ecosystems and absorbed by sediments or soil particles and can reach bodies of water through runoff. They can also affect humans through food. There is very little background information on the health risks of nickel, which is why it is important to know the bioavailability of this element. Therefore, more studies should be done on this element in food, given its direct relationship with its toxicity to humans.

Keywords: feeding, bioavailability, toxicological risk.



► INTRODUCCIÓN

En México, existen reportes de la presencia de elementos potencialmente tóxicos en ríos, lagos, cultivos, suelos, aire, así como en ambientes costeros y marinos donde se ha revelado la acumulación de elementos tóxicos en diferentes tejidos de peces, crustáceos y moluscos (entre otros), que se utilizan para el consumo humano (Frías-Espericueta *et al.*, 2008; González-Dávila, Gómez-Bernal & Ruíz-Huerta, 2012; García-Hernández *et al.*, 2015).

El níquel es un micronutriente esencial que se encuentra en el aire, suelo, agua, alimentos (semillas) y utensilios como monedas, bisutería y relojes. También lo podemos localizar en meteoritos y en el fondo del océano en bultos de minerales llamados nódulos del fondo del mar (ATSDR, 2024).

La liberación de níquel al medio ambiente se debe al proceso de extracción minera y a su uso en las industrias que fabrican o usan aleaciones o compuestos de este elemento, liberándolo en las aguas residuales. También se dispersa a la atmósfera por las centrales eléctricas que queman petróleo, carbón y en los crematorios de basura (ATSDR, 2016). Debido a que el níquel es liberado por diferentes fuentes al medio ambiente es altamente probable que una variedad de organismos vivos estén expuestos a sus efectos tóxicos en un momento u otro de sus vidas (Ahmad & Ashraf, 2011). El níquel es requerido en pequeñas cantidades para los seres vivos, pero cuando es ingerido en muy altas concentraciones puede ser peligroso para la salud humana (Eisler, 2000).

Para conocer los niveles de níquel se realizan monitoreos ambientales en especímenes de importancia comercial. Los peces son organismos acuáticos que tienden a bioacumular elementos potencialmente tóxicos en concentraciones superiores a las del medio, este problema de acumulación se debe a la biomagnificación de estos contaminantes a través de las redes tróficas. La afinidad y toxicidad que tienen estos elementos en los organismos acuáticos puede influir en su concentración, el tiempo de exposición y los factores bióticos (plantas, animales, microorganismos) y abióticos (temperatura, oxígeno, el agua, la luz solar) del ecosistema (Castañé, Topalián, Cordero, & Salibián, 2003).

En los humanos la principal ruta de ingestión de níquel es por medio de los vegetales que proceden de suelos contaminados, mediante inhalación de vapores de este elemento y por la exposición de níquel al respirar el aire, beber agua, ingerir alimentos o fumar cigarrillos (Rodríguez-Heredia, 2017).

Presencia de níquel en pescados y mariscos

Las principales fuentes de níquel en los sistemas acuáticos son las escorrentías, los procesos industriales, los ciclos biológicos y la erosión de las rocas. En cuanto al ser humano llegan a través de los organismos que consumimos, en este caso peces y mariscos (Sadeghi, Tavassoli, Amini, Ebrahimzadeh & Daei, 2011).

En la Tabla 1 se presenta la presencia de níquel en pescados y mariscos de diferentes áreas, tanto nacionales como internacionales. Se han detectado cantidades elevadas por Márquez *et al.* (2008) en *Penaeus schmitti*; Franco-Solórzano (2015) en *Callinectes arcuatus*; Ayanda, Ekhaton, & Bello (2019), en *Malapterurus electricus* (bagre); Álvaro-Berlanga (2019) en *Carcharhinus falciformis*; y Dehghani, Sana, Mohammad, & Moein 2021 en *Penaeus merguensis* superando el Límite Máximo Permisible (LMP) que establece la USEPA 2011 de 0.2 mg/kg. Mientras que Fuentes-Gándara, Pinedo-Hernández, & Marrugo-Negrete 2018, reportaron en *Mugil Curema* en Ciénega de Mallorquín, Colombia, 0.15 donde el valor está por debajo de los LMP.

Tabla 1. Contenido de níquel en músculo de pescados y mariscos según estudios recientes.

Especie	Área de estudio	Ni mg/kg	Referencia
<i>Penaeus schmitti</i> (Camarón casqui azul)	Laguna de Unare, Anzoátegui, Venezuela	0.44	Aristide-Márquez <i>et al.</i> (2008)
<i>Callinectes arcuatus</i> (Jaiba cuata)	Guayaquil, Ecuador	10.51	Franco-Solórzano (2015)
<i>Mugil curema</i> (Lisa plateada)	Ciénega de Mallorquín Colombia	0.15	Fuentes-Gándara <i>et al.</i> (2018)
<i>Malapterurus electricus</i> (Bagre)	Río Ogun, suroeste de Nigeria	16.74	Ayanda <i>et al.</i> (2019)
<i>Carcharhinus falciformis</i> (Tiburón piloto)	Manzanillo, Colima. México.	3.58	Álvaro-Berlanga (2019)
<i>Penaeus merguensis</i> (Camarón banana)	Golfo Pérsico	6.11	Dehghani <i>et al.</i> (2021)



La contaminación por níquel es variable, dependiendo de la fuente de exposición y de los aspectos biológicos de los organismos expuestos. En la India Dhaneesh, Gopi, Ganeshamurthy, Kumar, & Balasubramanian (2012) reportaron que las principales fuentes de contaminación provenían de los desechos de los buques y de las pinturas que utilizaban para dar mantenimiento a los barcos. En el agua del Mediterráneo (Maceda-Veiga, Monroy & de Sostoa, 2012) encontraron que las mayores causas de contaminación provenían de la agricultura, industria y las aguas residuales.

Toxicidad del níquel

La toxicidad por níquel puede ser aguda y se determina por la exposición a este elemento en un periodo de entre 12 a 70 h, mientras que la toxicidad crónica sucede luego de una exposición mayor a 100 días.

Toxicidad aguda: Los síntomas inmediatos son dolor de cabeza, náuseas, vómitos, irritación en la piel e insomnio, síntomas que suelen durar algunas horas. Los síntomas aplazados pueden causar opresión en el pecho, tos, asfixia, fatiga, taquicardia, sudoración, vértigos, debilidad y cansancio (Kas, Das, & Dhundasi, 2008; Forti *et al.*, 2011).

Toxicidad crónica sucede en personas que están expuestas por vía de inhalación en un periodo mayor a los 100 días. Uno de los casos es el polvo de níquel que produce las aleaciones empleadas en soldadura el cual provoca trastornos respiratorios como asma, bronquitos, sinusitis y posible daño pulmonar (Schram, Warshaw, & Laumann, 2010; Brouwere, Buekers, Cornelis, Schlekat, & Oller, 2012). Asimismo, el níquel es un elemento cancerígeno, se ha comprobado que trabajadores de refinerías de este elemento presentan un alto riesgo de padecer diferentes tipos de cáncer en el pulmón y la cavidad nasal (Muñoz, & Costa, 2012; AESAN, 2020).

En la actualidad, no hay ninguna legislación mexicana sobre el Límite Máximo Permisible (LMP) de níquel. En cuanto, a normas internacionales la USEPA (2011) establece como LMP el valor de 0.2 mg/kg para níquel.

La ingesta diaria admisible (IDA) es de 1.5 mg/día para hombres y mujeres (no embarazadas) adultos (EFSA, 2006).



Principales usos del níquel

Los principales usos de este elemento en la industria se dan en la elaboración de aceros inoxidables, aleaciones, electrochapados de aparatos electrónicos y recubrimientos de piezas metálicas (automóviles, utensilios de cocina, etc.), acumuladores, baterías alcalinas (Níquel-cadmio), acuñación de monedas, material electrónico, en pigmentos para pinturas y cerámicas entre otros. El níquel es liberado al aire por las plantas de energía y las incineradoras de basuras (Doria-Argumedo, & Sierra, 2019).

► CONCLUSIONES

Es necesario el desarrollo de estudios en pescados y mariscos para establecer la incidencia de las enfermedades causadas por el consumo y toxicidad del níquel tales como dermatitis, enfermedades respiratorias y cáncer. También es necesario ampliar las investigaciones de la ingesta de níquel en las diferentes zonas de nuestro país donde se encuentran estos organismos, aplicando monitoreo ambiental, con el fin de determinar el límite máximo permitido en comparación de otros países. Hasta el momento se han realizado pocos trabajos de investigación acerca del riesgo a la salud humana por consumo de pescados y mariscos, por lo que se requiere la ampliación de estudios en los próximos años.

► LITERATURA CITADA

- AESAN (Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición) (2020).** Níquel. Ministerio de consumo. https://www.aesan.gob.es/AECOSAN/docs/documentos/seguridad_alimentaria/gestion_riesgos/FICHA_NIQUEL.pdf.
- Ahmad, M. S., & Ashraf, M. (2011).** Essential roles and hazardous effects of nickel in plants. *Review of Environmental Contamination and Toxicology*, 214, 125-167.



Álvaro-Berlanga, S. (2019). Elementos químicos en tejido muscular de tres especies de tiburón, *Prionace glauca*, *Carcharhinus falciformis* y *Alopias pelagicus* en la costa de Manzanillo, Colima, México.

Márquez, A., Senior, W., Fermín, I., Martínez, G., Castañeda, J., & González, A. (2008). Cuantificación de las concentraciones de metales pesados en tejidos de peces y crustáceos de la Laguna de Unare, estado Anzoátegui, Venezuela. *Revista Científica*, 18(1), 73-86. Recuperado el 22 de enero de 2025, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-22592008000100012&lng=es&tlng=es.

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (2005). ToxFAQs™ – Níquel (Nickel)

ATSDR (Agency for Toxic Substances and Disease Registry). (2016). Toxicological Profile for Nickel. <https://www.cdc.gov/TSP/ToxProfiles/ToxProfiles.aspx?id=245&tid=44>

Ayanda, I. O., Ekhaton, U. I., & Bello, O. A. (2019). Determination of selected heavy metal and analysis of proximate composition in some fish species from Ogun River, Southwestern Nigeria. *Heliyon*, 5, E02512. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e02512>

Brouwere, K., Buekers, J., Cornelis, C., Schlekot, C., & Oller, A. (2012). Assessment of indirect human exposure to environmental sources of nickel: Oral exposure and risk characterization for systemic effects. *Science of the Total Environment*, 419, 25-36. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.12.049>

Castañé P. M., Topalián M. L., Cordero R., & Salibián A. (2003). Influencia de la especiación de los metales pesados en medio acuático como determinante de su toxicidad, 20: 13-18.

Dhaneesh, K.V., Gopi, M., Ganeshamurthy, R., Kumar, T. T., & Balasubramanian, T. (2012). Bio-Accumulation of metals on reef associated organisms of Lakshadweep archipelago. *Food Chemistry*, 131, 985 - 991. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2011.09.097>



- Dehghani, M., Sana S., Mohammad R. T., & Moein, N. (2021).** Tracing the heavy metals zinc, lead and nickel in banana shrimp (*Penaeus merguensis*) from the Persian Gulf and human health risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 28, 38817-38828. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13063-w>
- Doria-Argumedo, C., & Sierra, J. (2019).** Niveles de metales en el río Ranchería, La Guajira. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas*, 15, 26-32.
- EFSA (European Food Safety Authority). (2006).** Tolerable upper intake levels for vitamins and minerals. <http://www.efsa.europa.eu/en/ndatopics/docs/ndatolerableuil.pdf>.
- Eisler, R. (2000).** Handbook of chemical risk assessment: health hazards to humans, plants, and animals. Three Volume Set (1a ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780367801397>
- Forti, E., Salovaara, S., Cetin, Y., Bulgheroni, A., Tessadri, R., Jennings, P., & Prieto, P. (2011).** In vitro evaluation of the toxicity induced by nickel soluble and particulate forms in human airway epithelial cells. *Toxicology In Vitro*, 25, 454-461. <https://doi.org/10.1016/j.tiv.2010.11.013>
- Franco-Solórzano, J. G. (2015).** Determinación de niveles de mercurio, cadmio, níquel, cromo y plomo en tejido blando, hepatopáncreas en la jaiba azul (*Callinectes arcuatus*) y sedimento en los ramales del Estero Salado. Universidad de Guayaquil Facultad de Ciencias Naturales Escuela de Biología. Guayaquil, Ecuador.
- Frías-Espericueta, M. G., Osuna-López, J. I., Voltolina, D., López-López, G., Izaguirre-Fierro, G., & Muy-Rangel M. D. (2008).** The metal content of bivalve mollusks of a coastal lagoon of NW México. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 80: 90-92. DOI:10.1007/s00128-007-9322-4
- Fuentes-Gándara, F., Pinedo-Hernández, J., & Marrugo-Negrete, J. (2018).** Metales pesados en especies ícticas de la ciénaga de mallorquín, Colombia. Vol. 39 (Nº 03). p. 19



- García-Hernández, J., Espinosa-Romero, M. J., Cisneros-Mata, M. A., Leyva-García, G., Aguilera-Márquez, D., & Torre-Cosío, J. (2015).** Concentración de mercurio y plaguicidas organoclorados (POC) en tejido comestible de jaiba café *Callinectes bellicosus* de las costas de Sonora y Sinaloa, México. *Ciencia Pesquera*, 23: 65-79.
- González-Dávila, O., Gómez-Bernal, J. M., & Ruíz-Huerta, E. A. (2012).** Plants and soil contamination with heavy metals in agricultural areas of Guadalupe, Zacatecas, Mexico. *Environmental Contamination*, 37-50.
- Kas, K., Das, S., & Dhundasi, S. (2008).** Nickel, its adverse health effects and oxidative stress. *Indian Journal of Medical Research*, 128, 412-425.
- Muñoz, A., & Costa, M. (2012).** Elucidating the mechanisms of nickel compound uptake: A review of particulate and nano-nickel endocytosis and toxicity. *Toxicology Applied and Pharmacology*, 260, 1–16. doi: 10.1016/j.taap.2011.12.014
- Maceda-Veiga, A., Monroy, M., & de Sostoa, A. (2012).** Metal bioaccumulation in the Mediterranean barbel (*Barbus meridionalis*) in a mediterranean river receiving effluents from urban and industrial wastewater treatment plants. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 76: 93-101.
- Rodríguez-Heredia D. (2017).** Intoxicación ocupacional por metales pesados. *MEDISAN*, 21 (12), 3372-3385. <http://scielo.sld.cu/pdf/san/v21n12/san122112.pdf>
- Sadeghi, O., Tavassoli, N., Amini, M M., Ebrahimzadeh, H., & Daei, N. (2011).** Pyridine functionalized mesoporous silica as an adsorbent material for the determination of nickel and lead in vegetables grown in close proximity by electrothermal atomic adsorption spectroscopy. *Food Chemistry*, 127, 364–368. doi: 10.1016/j.foodchem.2010.12.159
- Schram, S., Warshaw, E., & Laumann, A. (2010).** Nickel hypersensitivity: A clinical review and call to action. *International Journal of Dermatology*, 49, 115–125. doi:10.1111/j.1365-4632.2009.04307.x



USEPA (United States Environmental Protection Agency). (2011).
Regional Screening Level (RSL) Summary Table: November
2011. (Available at :
<http://www.epa.gov/regshwmd/risk/human/Index.htm>).



Nota Científica

***Metamysidopsis frankfiersi* (Crustacea: Mysidae) hospedero intermediario de *Rhadinorhynchus trachinoti* (Acanthocephala: Rhadinorhynchidae) en la costa de Mazatlán, Sinaloa**

***Metamysidopsis frankfiersi* (Crustacea: Mysidae) is the intermediate host of *Rhadinorhynchus trachinoti* (Acanthocephala: Rhadinorhynchidae) on the coast of Mazatlán, Sinaloa**



1. América Elizabeth Hernández-Flores



0009-0007-0446-678X

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa



2. Ana L. Sereno-Uribe



0000-0002-1054-1930

Instituto de Biología, Universidad Nacional Autónoma de México, Ap. Postal 70-153. C.P., 045 10 México D.F., México ALSU



3. Diana Judith López-Peraza



0000-0002-7344-4134

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa



4. Mayra I. Grano-Maldonado



0000-0001-7519-379X

Facultad de Ciencias del Mar, Universidad Autónoma de Sinaloa, Mazatlán, Sinaloa
Autor de correspondencia: granomayra@uas.edu.mx

latindex



CREATIVE COMMONS



OPEN ACCESS

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el origina

***Metamysidopsis frankfiersi* (Crustacea: Mysidae)
hospedero intermediario de *Rhadinorhynchus
trachinoti* (Acanthocephala: Rhadinorhynchidae)
en la costa de Mazatlán, Sinaloa**

***Metamysidopsis frankfiersi* (Crustacea: Mysidae)
is the intermediate host of *Rhadinorhynchus
trachinoti* (Acanthocephala: Rhadinorhynchidae)
on the coast of Mazatlán, Sinaloa**

▶ RESUMEN

En este trabajo se identificó la variación de la población de parásitos en muestras de plancton que presentan infecciones naturales del misidáceo *Metamysidopsis frankfiersi* Hendrickx & Hernández-Payán 2023 recolectadas en la Isla de la Piedra y la bahía de Mazatlán, Sinaloa. El objetivo de este estudio fue registrar la presencia del parásito acantocéfalo *Rhadinorhynchus trachinoti* Grano-Maldonado, Sereno-Uribe, Hernández-Payán, Pérez-Ponce de León & García-Varela 2024. Se determinaron los parámetros ecológicos de infección: prevalencia, abundancia e intensidad promedio presentes en muestras de zooplancton. El parásito fue encontrado como cistacanto (fase larvaria) en el cefalotórax del crustáceo misidáceo *Metamysidopsis frankfiersi* como su hospedero intermediario. Se recolectaron un total de 412 crustáceos (154 machos y 268 hembras) de los cuales 3 machos y 2 hembras se encontraron parasitados; con una prevalencia de 1.21%, abundancia de 0.0121 y una intensidad promedio de 1. En este trabajo se registró por primera vez a *Rhadinorhynchus trachinoti* en la Isla de la Piedra, en Mazatlán Sinaloa y se aportaron datos de la dinámica poblacional del parásito, lo que aporta datos importantes de la biología, biodiversidad, hospederos involucrados de los sistemas parásito-hospedero.

Palabras clave: zooplancton, cistacanto, misidáceo, parásito, Sinaloa



► ABSTRACT

In this work, the variation of the parasite population was identified in plankton samples from natural infections of the mysidacean *Metamysidopsis frankfiersi* Hendrickx & Payán collected on Stone Island and Mazatlán Bay, Sinaloa. The objective of this study was to record the presence of the acanthocephalan parasite *Rhadinorhynchus trachinoti* Grano-Maldonado, Sereno-Uribe, Hernández-Payán, Pérez-Ponce de León & García-Varela, 2024. The ecological parameters of infection were determined: prevalence, abundance, and average intensity in zooplankton samples. The parasite was found as a cystacanth (larval phase) in the cephalothorax of the mysidacean crustacean *Metamysidopsis frankfiersi* Hendrickx & Payán as its intermediate host. A total of 412 crustaceans were collected (154 males and 268 females), of which 3 males and 2 females were found parasitized; with a prevalence of 1.21%, an abundance of 0.0121, and an average intensity of 1. In this work, *Rhadinorhynchus trachinoti* was recorded for the first time on Isla de la Piedra, in Mazatlán Sinaloa, and data on the population dynamics of the parasite were provided, which provides important data on the biology, biodiversity, and hosts involved in the parasite-host systems.

Keywords: zooplankton, cystacanth, mysidacean, parasite, Sinaloa

► INTRODUCCIÓN

Los acantocéfalos o gusanos de cabeza espinosa son un grupo de helmintos endoparásitos que se caracterizan principalmente por su estructura anterior llamada probóscide, la cual es retráctil y armada con ganchos. Tienen un cuerpo blando y cilíndrico. Este grupo es conocido por la estructura y anatomía de la proboscis y por su capacidad de modificar la forma física de su hospedero como la coloración y la estructura, entre otros aspectos físicos, así como alterar el comportamiento de los organismos infectados (García-Prieto, García-Varela & Mendoza-Garfias, 2013). Estos organismos tienen un ciclo de vida indirecto que incluye etapas en las que requieren hospederos

intermediarios para su desarrollo completo. En este contexto, la especie *Metamysidopsis frankfiersi* perteneciente al orden Mysidacea juega un papel fundamental como hospedero intermediario para los cistacantos (fase larvaria) específicamente en los ciclos de vida de los acantocéfalos en Sinaloa. Estos organismos son crustáceos pequeños que constituyen una parte importante de la cadena trófica en ecosistemas marinos, los cuales, al formar parte del zooplancton, sirven de presa para peces y otros depredadores (Hendrickx & Hernández-Payán, 2023).

La infección por acantocéfalos en crustáceos no solo afecta la biología y el comportamiento de los hospederos, sino que también puede tener repercusiones ecológicas importantes en la estructura de los organismos y las redes tróficas en estas zonas (Poulin, 2010). A través de este estudio, se espera contribuir al conocimiento de la diversidad de parásitos marinos en la región del noroeste del Pacífico mexicano y comprender mejor las dinámicas ecológicas que rigen la presencia de estos organismos en ambientes costeros.

► MATERIAL Y MÉTODOS

En el verano, durante los meses de julio-agosto de 2024, se realizaron dos arrastres de zooplancton en playa norte en la bahía de Mazatlán y en la Isla de la Piedra, Mazatlán. Los arrastres se realizaron en la zona de oleaje o rompiente a aproximadamente a 1 m de profundidad, con una red de tipo cuchara, seguido de una red de plancton cónica pequeña (apertura de malla de 0,5 mm). Las muestras obtenidas se conservaron en un frasco con alcohol al 70% de concentración para su posterior análisis. En el laboratorio del CA-UAS-162 en la Facultad de Ciencias del Mar, las muestras se separaron por diferentes grupos taxonómicos, como peces y crustáceos. Las larvas de peces fueron descartadas y se contabilizaron solo los crustáceos, en este caso los misidáceos de la especie *Metamysidopsis frankfiersi* presentes. Se observaron los crustáceos bajo el estereomicroscopio y se extrajeron los cistacantos del cefalotórax con ayuda de una aguja de disección y un pincel, los cistacantos se contaron y colocaron en etanol al 96%. Los hospederos intermediarios fueron separados por sexos (macho-hembra) con base en

las siguientes características morfológicas: en el caso de los machos son reconocidos por algunas estructuras ausentes en las hembras (e.g. pene ubicado en la base del octavo periópodo, proceso masculino ubicado por debajo de las antenas pedunculares y una en la escama antenal) además de pleópodos son birrámeos y mucho más desarrollados que en las hembras. Por otro lado, las hembras fueron reconocidas por presentar unas estructuras en forma de marsupio o bolsa embrionaria, que comienzan desde el cuarto pereiópodo y terminan al inicio del primer segmento abdominal, en esta estructura se presentaron embriones en diferentes etapas de desarrollo o hembras no ovadas (Hendrickx & Hernández-Payán, 2023), los parámetros ecológicos se evaluaron de acuerdo con Bush, Lafferty, Lotz & Shostak (1977).

▶ RESULTADOS

Se identificó al acantocéfalo *Rhadinorhynchus trachinoti* (Grano-Maldonado et al., 2024) en el cefalotórax del crustáceo *M. frankfiersi* en la localidad de la Isla de la Piedra (Figura 1). Sin embargo, no hubo presencia de cistacantos en las muestras de la localidad de Playa Norte (Figura 2). Los cistacantos se identificaron como *R. trachinoti*, esta especie, se distingue morfológicamente de los otros 38 congéneres por tener una probóscide larga y cilíndrica armada con 12 filas longitudinales que sostienen entre 16 y 18 ganchos cada una (Grano-Maldonado et al., 2024). Se colectaron un total de 412 organismos misidáceos: 154 machos y 268 hembras, de los cuales 3 machos y 2 hembras se encontraron parasitados por *R. trachinoti*. Con una prevalencia de 1.12%, abundancia de 0.0121 e intensidad promedio de 1.

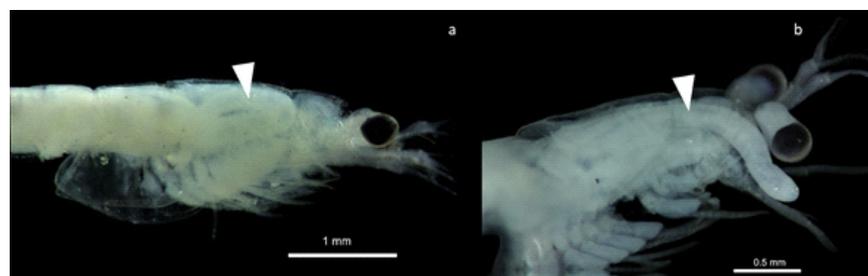


Figura 1. Ejemplares de *Metamysidopsis frankfiersi* (Crustacea: Mysidae) recolectados en la Isla de la Piedra en Mazatlán Sinaloa. a) Hembra y b) Macho parasitados con cistacantos de *Rhadinorhynchus trachinoti* (Acanthocephala) (flecha).

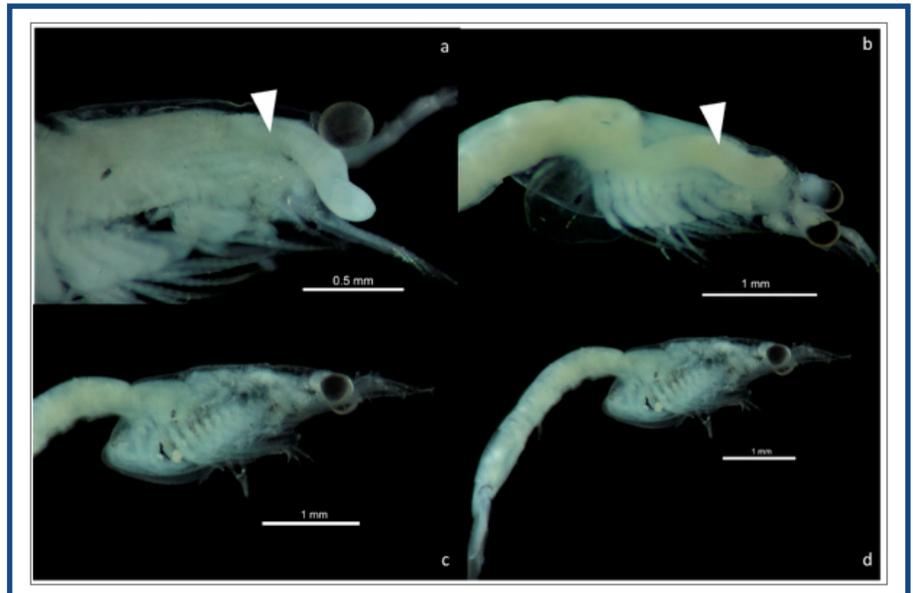


Figura 2. *Metamysidopsis frankfiersi* (Crustacea: Mysidae) recolectadas en la Isla de la Piedra en Mazatlán Sinaloa. A) macho y b) hembra, organismos parasitados con cistacantos de *Rhadinorhynchus trachinoti* (Acanthocephala) (flecha); c) y d) hembras no parasitadas.

DISCUSIÓN

Los organismos del misidáceo *Metamysidopsis frankfiersi*, recolectados en la Isla de la Piedra, parasitados con cistacantos, se asemejaron a los encontrados en la costa de Nayarit presentes en el misidáceo de la misma especie (Grano-Maldonado et al., 2024). Este acantocéfalo corresponde morfológicamente al género *Rhadinorhynchus* Lühe, 1911 y este organismo se distingue morfológicamente de los otros 38 congéneres por tener una probóscide larga y cilíndrica armada con 12 filas de entre 16 y 18 ganchos longitudinales (Grano-Maldonado et al., 2024). Estos últimos autores, describieron la información ecológica de los parásitos *R. trachinoti* en Nayarit y describieron el estadio adulto de *R. trachinoti* que se encontró en el intestino de pámpanos *Trachinotus rhodopus* en las costas de Mazatlán. Esto coincide con lo publicado por Amin (2020) que realizó una amplia investigación del género *Rhadinorhynchus* que, en estado adulto, es un acantocéfalo que infecta los intestinos de peces marinos distribuidos globalmente. *Rhadinorhynchus trachinoti* se distribuye a lo largo de la costa del Pacífico Mexicano, desde la entrada



del golfo de California en las costas de Sinaloa hasta el golfo de Tehuantepec en Oaxaca. Los datos morfológicos y moleculares obtenidos de los ejemplares de Nayarit fueron clave para vincularlos con los organismos encontrados en la Isla de la Piedra. Con la aportación de este estudio se pretende incrementar el estudio de especies parásitas en la zona sur del golfo de California.

► AGRADECIMIENTOS

M en C José Carlos Hernández-Payán por el apoyo recibido para los muestreos en Playa Norte e Isla de la Piedra. Extendemos el agradecimiento al Dr. José Salgado-Barragán por el uso de los microscopios y fotografías. Al Dr. Martín García Varela por sus comentarios taxonómicos con respecto a la especie del cistacanto (acantocéfalo). A los compañeros de servicio social, Sandra Pérez Vallejo, Jaqueline Muñoz Lizárraga, Tania Flores Pineda, Edén Rodríguez Vázquez que apoyaron para el conteo de organismos en el zooplancton.

► LITERATURA CITADA

- Amin, O. M. (2020).** Redescription of *Rhadinorhynchus trachuri* Harada, 1935 (Acanthocephala: Rhadinorhynchidae) from marine fish in Vietnam and California with a discussion of its zoogeography. *Acta Parasitológica*, 65, 77-89.
<https://doi.org/10.2478/s11686-019-00130-z>
- Bush, A. O., Lafferty, K. D., Lotz, J. M., & Shostak, A. W. (1997).** Parasitology meets ecology on its terms: Margolis et al. revisited. *Journal of Parasitology*, 84, 575-583.
- García-Prieto, L., García-Varela, M., & Mendoza-Garfias, B. (2013).** Biodiversidad de Acanthocephala en México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 85, 177-182.
<https://doi.org/10.7550/rmb.31684>



- Grano-Maldonado, M. I., Sereno-Uribe, A. L., Hernández-Payán, J. C., Pérez-Ponce de León, G., & García-Varela, M. (2024).** Linking adults and cystacanths of a new species of *Rhadinorhynchus* Lühe, 1911 (Acanthocephala: Rhadinorhynchidae) from the Pacific coast of Mexico by using morphological and molecular data. *Systematic Parasitology*, 102, 10 <https://doi.org/10.1007/s11230-024-10205-9>
- Hendrickx, M. E., & Hernández-Payán, J. C. (2023).** The genus *Metamysidopsis* W. M. Tattersall, 1951 (Peracarida, Mysida, Mysidae) in the eastern Pacific with the description of a new species from western Mexico and notes on some diagnostic characters used in the genus. *Crustaceana*, 96 (5), 423-453. <https://doi.org/10.1163/15685403-bja10293>
- Poulin, R. (2010).** Parasite manipulation of host behavior. *Advances in the study of behavior*, 41, 151-186. [https://doi.org/10.1016/s0065-3454\(10\)41005-0](https://doi.org/10.1016/s0065-3454(10)41005-0)



Nota

Científica

Polyandry in *Gymnura marmorata* from the Upper Gulf of California

Poliandria en *Gymnura marmorata* del Alto Golfo de California



1. Nancy C. Saavedra-Sotelo



0000-0001-9277-0675

Laboratorio de Ecología Molecular y Evolución,
Facultad de Ciencias del Mar, Universidad
Autónoma de Sinaloa, Paseo Clausen S/N,
Col. Los Pinos, Mazatlán, Sinaloa,
C.P. 82000, México.

"Investigadoras e Investigadores por México"
SECIHTI, Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación. Av. Insurgentes Sur 1582,
Col., Crédito Constructor, Demarcación Territorial
Benito Juárez. Ciudad de México, C.P. 03940,
México".

Autor de correspondencia: nsaavedra@uas.edu.mx

latindex



CREATIVE COMMONS



OPEN ACCESS

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el original.



Polyandry in *Gymnura marmorata* from the Upper Gulf of California

Poliandria en *Gymnura marmorata* del Alto Golfo de California

► ABSTRACT

Reproductive behavior in elasmobranchs is challenging to assess due to the few tools available to study their mating systems. Molecular techniques offer an indirect approach to examine paternity in pups and identify putative fathers. This study presents the first record of the mating system of the California butterfly ray (*Gymnura marmorata*) using microsatellite molecular markers. A pregnant female, with a disk width (DW) of 95 cm and carrying 13 pups, was collected in Puerto Libertad, Sonora, Mexico. Paternity analyses detected that the litter was sired by at least two males, with a clear bias towards one dominant male who fathered most of the pups. Additionally, embryos sired by this dominant male had the largest DWs, suggesting a possible influence of sexual selection in this species.

Key words: polyandry, multiple paternity, paternity biasing, Chondrichthyes



► RESUMEN

El comportamiento reproductivo en elasmobranchios es difícil de evaluar debido a la limitada disponibilidad de herramientas para estudiar sus sistemas de apareamiento. Las herramientas moleculares ofrecen una aproximación indirecta para examinar la paternidad en las crías e identificar los posibles padres. Este estudio representa el primer registro del sistema de apareamiento en la raya mariposa (*Gymnura marmorata*) utilizando marcadores microsatélites. Se colectó una hembra preñada con un ancho de disco (AD) de 95 cm y con 13 embriones en Puerto Libertad, Sonora, México. Los análisis de paternidad detectaron que la camada fue fecundada por al menos dos machos diferentes con sesgo en la paternidad, donde un macho fecundó la mayoría de las crías. Además, los embriones del padre dominante presentaron un mayor tamaño de AD, sugiriendo una posible influencia de selección sexual en esta especie.

Palabras clave: poliandria, paternidad múltiple, sesgo de paternidad, Chondrichtios.

► INTRODUCTION

The mating systems of elasmobranchs, particularly ray species, remain poorly understood (Chevolot, Ellis, Rijnsdorp, Stam, Olsen, 2007). To better assess the vulnerability of these species to fishing pressures and develop more effective management and conservation strategies, it is crucial to gather insights into their reproductive biology and life history (Rowe and Hutchings, 2003). Among Chondrichthyes, mating systems are usually complex, with many studies documenting the prevalence of multiple paternity (MP), with females exhibiting polyandrous behavior (Lamarca, Carvalho, Vilasboa, Netto-Ferreira, Vianna, 2020; Lyons, Kacev, Mull, 2021).

Reproductive behavior studies in sharks are inherently challenging due to the difficulty of direct observation in their natural habitats. Nevertheless, for several decades, paternity analysis has proven to be an invaluable tool for investigating aspects of reproductive behavior in wild organisms (Di Fiore, 2003; Uller and Olsson, 2008; Portnoy and Heist, 2012). In elasmobranch



species, most insights into mating systems have been derived from paternity studies employing microsatellite markers (e.g. Chapman, Prodöhl, Gelsleichter, Manire, Shivji, 2004; Chevolut et al., 2007; Portnoy, Piercy, Musick, Burgess, Graves, 2007; Byrne and Avise 2012; Lyons, Chabot, Mull, Holder, Lowe, 2017). These markers are particularly useful for inferring paternal alleles when maternal genotypes are known. In Mexico, research on this topic remains limited; however, it represents a growing field of scientific interest (Tárula-Marín and Saavedra-Sotelo, 2021; Rendón-Herrera, Pérez-Jiménez, Saavedra-Sotelo, 2022; Armanda-Tapia, Castillo-Geniz, Victoria-Cota, Arce-Valdez, Enríquez-Paredes, 2023).

Fewer records of MP exist for rays compared to sharks (Chevolut et al., 2007; Lyons et al., 2017; Yano, Sato, Takahashi, 1999). Therefore, further studies on ray mating systems are needed to inform future fisheries management strategies. Current knowledge on ray mating systems is limited, making it challenging to assess the impacts of these systems on population recovery rates, particularly for species under fishing pressure. Reproductive behaviors, such as mate competition or choice, can have notable consequences for the recovery of commercially exploited marine species (Rowe and Hutchings, 2003). Understanding these dynamics is essential for improving conservation efforts.

The California butterfly ray, *Gymnura marmorata* (Cooper 1864), ranges from southern California to Mexico, including the Gulf of California (Yokota, White, De Carvalho, 2016). This species is aplacental viviparous, with matrotrophy and histotrophy, and uterine villi secrete lipid-rich histotroph to nourish embryos (Mossman, 1987; Wourms and Bodine, 1983). Such supplemental nutrition involves a high energetic investment from females, which is present before and after egg fertilization (Lyons et al., 2017). The California butterfly ray has a gestation period of 9 to 12 months, with fecundity ranging from 2 to 16 pups per litter, as well as an annual reproductive cycle (Burgos-Vázquez, 2013; Dávila-Ortiz, 2002; Yokota et al., 2016). These reproductive traits suggest that mate selection is crucial, as the energetic investment of females to produce high-quality offspring with greater chances of survival is likely notable (Lyons et al., 2021). The aim of this study was to identify the mating system of *G. marmorata* in the Gulf of California through paternity analyses.



► MATERIAL AND METHODS

A gravid female with a disk width (DW) of 95 cm and bearing 13 pups was collected from an artisanal fishery in Puerto Libertad, Sonora, within the Gulf of California (29°54'15" N; 112°40'59" W). The organisms were collected in April 2017 using bottom-set gillnets operated by the artisanal fishery near Puerto Libertad. The DWs of the mother and pups were recorded, and tissue samples were collected for each individual. Samples were preserved in salt saturated 20% dymethylsulfoxide (DMSO) solution. Genomic DNA was isolated via proteinase K digestion, followed by a salting-out protocol using lithium chloride (Aljanabi and Martinez, 1997). The concentration and quality of DNA were verified by Nanodrop Lite (Thermo Fisher Scientific, Waltham, USA) and agarose gel (1.5%) electrophoresis. Two microsatellite loci (SER61 and SER263) previously developed for *Aetobatus narinari* (Sellas, Bassos-Hull, Hueter, Feldheim, 2011), were amplified for all samples. The amplicons were marked fluorescently with the universal primer M13 (De Arruda, Gonçalves, Schneider, Silva, Morielle-Versute, 2010).

The PCR profile consisted of two phases. The first phase consisted of 5 min at 94 °C followed by 20 cycles of 94 °C/15 s; 52 °C/30 s (SER61), 53 °C/30 s (SER263); and 72 °C/30 s. To conclude the first phase, M13 primer (0.5 μM) was added to each reaction. The second phase was comprised of 10 cycles at 94 °C/15 s; 53 °C/30 s; 72 °C/30 s; and 72 °C for 15 min. Each 10 μl reaction contained 0.2 μM of each dNTP and 1X PCR buffer, 0.5 μM of each primer, ½ U *Taq* DNApol (NEB, Ipswich, MA), and 10 ng of template DNA. Allele separation was performed on the automatic sequencer ABI 3100 (Applied Biosystems Inc, CA), and genotypes were scored on GENEMARKER v. 2.7.0 (SoftGenetics®).

To evaluate the effectiveness of loci in detecting multiple paternity, we conducted simulations of multiple paternity probabilities using the PrDM program (Neff and Pitcher, 2002). These simulations varied parameters such as the number of sires, litter size, and the reproductive skew, of putative fathers. Putative father genotypes were inferred using the programs GERUD v. 2.0 (Jones, 2005) and COLONY2 (Jones and



Wang, 2010; Wang, 2004, 2010). GERUD estimates paternal genotypes and calculates the minimum number of sires per litter. In contrast, COLONY uses a maximum likelihood algorithm to assign embryos in full- or half-sibling groups based on inferred parent-offspring relationships. Finally, due to the lack of normality of the data, differences in embryo size between sires were evaluated using the Mann-Whitney U test.

▶ RESULTS

Out of the 13 pups found, 6 pups were located in the left uterus and 7 pups in the right uterus (Table 1). The DW mean of embryos showed no significant differences between uteri ($p > 0.05$, Mann–Whitney U test; left uterus average DW = 17.67 cm, right uterus average DW= 16.82 cm). However, significant differences in embryo size were observed between sires ($p = 0.03$). Embryos sired by dominant male, defined as the father of the majority of the pups, were larger ($n = 5$, DW range = 17.2–18.2) compared to those sired by the second male ($n = 3$, DW range = 16.3–16.8).

Table 1. Summary of data. F: Female, M: Male, DW: Disc Width, DL: Disc Length, U: Uterus (L: Left, R: Right), Loci: Two microsatellites (SER61 and SER63) with allele sizes.

Individuals	Sex	DW	DL	U	Loci			
					SER61	SER63	SER61	SER63
Mother	F	95	55.7		156	160	246	248
Embryo 1	M	17.2	10.2	L	148	160	246	248
Embryo 2	F	17.7	10.1	L	156	148	246	246
Embryo 3	M	17.4	10	L	-	-	-	-
Embryo 4	M	17.6	10.2	L	160	160	246	248
Embryo 5	M	17.2	9.9	L	-	-	-	-
Embryo 6	F	18.2	10.2	L	160	160	246	248
Embryo 7	M	17.1	10.4	R	-	-	-	-
Embryo 8	M	17.5	10.1	R	160	160	246	248
Embryo 9	M	16.8	10.1	R	156	156	246	248
Embryo 10	M	16.7	9.9	R	156	160	246	248
Embryo 11	M	16.3	9.8	R	156	160	246	248
Embryo 12	M	17.4	10.2	R	-	-	-	-
Embryo 13	H	17.6	10	R	-	-	-	-



Due to DNA quality constraints, only eight offspring could be successfully genotyped. The genetic diversity was moderate to high in both loci (SER63 *Ho*: 0.875, *He*: 0.492; SER61 *Ho*: 0.500, *He*: 0.557). Prior to any analyses, we compared embryo genotypes with the mother genotype to identify at least one shared allele per locus (Table 1). Three paternal alleles were identified at the SER61 locus and two at the SER63 locus. The probability of detecting multiple paternity (PrDM) using two microsatellite loci was low under different scenarios (Table 2).

Table 2. Probability of detecting multiple paternity with PrDM using two microsatellite loci in *Gymnura marmorata* under different scenarios of multiple mating.

No. Sires (Reproductive skew)	Litter size					
	5	10	15	16	17	18
2 (0.5:0.5)	0.055	0.154	0.204	0.216	0.211	0.219
2 (0.067:0.333)	0.049	0.14	0.192	0.197	0.202	0.207
2 (0.75:0.25)	0.042	0.122	0.17	0.177	0.18	0.187
3 (0.333:0.333:0.333)	0.085	0.252	0.349	0.357	0.369	0.377
3 (0.57:0.285:0.145)	0.069	0.211	0.296	0.308	0.32	0.331
4 (0.25:0.25:0.25:0.25)	0.104	0.315	0.435	0.452	0.465	0.478
4 (0.52:0.27:0.14:0.07)	0.081	0.248	0.354	0.373	0.383	0.399
5 (0.20:0.20:0.20:0.20:0.20)	0.112	0.358	0.499	0.515	0.529	0.545
5 (0.50:0.26:0.13:0.07:0.04)	0.087	0.266	0.386	0.398	0.413	0.428

GERUD indicated a minimum number of two sires, while COLONY2 suggested between one and six sires using under various mating scenarios, including monogamy, polyandry, polygyny, and promiscuity. These results were then used in COLONY2 to assign paternity and sibling relationships among pups based on their genotypes using a maximum likelihood framework (Figure 1).

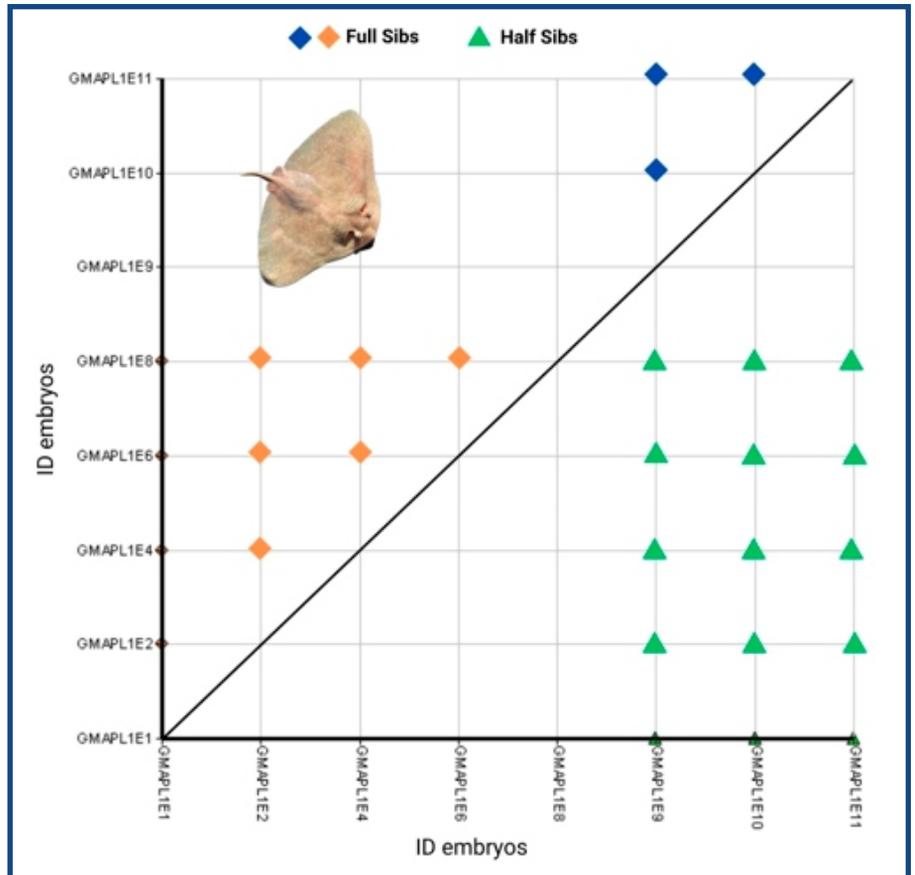


Figure 1. Kinship analyses among pups of the litter of the sampled *Gymnura marmorata* female. Axes show each pup.

DISCUSSION

Two males were identified as likely sires of the litter, establishing the first confirmed case of multiple paternity (MP) in *G. marmorata*. We prioritized the number of sires and genotypes estimated by GERUD, given that COLONY2 has been known to overestimate the number of putative sires due to over-split –(Sefc and Koblmüller, 2009). Over-split sibships occur if the probability of exclusion (0.0063–0.0901) is low despite the high probability of inclusion (0.490–1), which results in an overestimated number of sires.

Despite the limited number of loci used in this analysis, it was possible to detect the number of sires. The lower amplification and genotyping success in this study could be attributed to the use of primers developed for another species and the low quality of DNA in some samples.



Although only two microsatellite loci were analyzed, the genetic variability detected was sufficient to identify multiple sires (H_o : 0.875 and 0.500). However, it is acknowledged that in the multiple paternity simulations, the probability of detecting multiple sires in a scenario involving 13 embryos and two males was low with the available dataset (Table 2). Ongoing research aims to apply high-coverage genetic analysis (SNPs) to a larger sample size, allowing us to further validate these preliminary findings.

As highlighted earlier, elasmobranchs invest substantial energy in producing offspring, which necessitates a mechanism to ensure high quality progeny with an enhanced chance of survival (Lyons et al., 2021). This is often achieved through cryptic sexual selection mechanisms in both sexes, a potent selective force driving the evolution of diverse sexual traits (Birkhead, Hosken, Pitnick, 2009; Birkhead and Møller, 1998). Studies on cryptic sexual selection in elasmobranchs have focused mainly on females, as evaluating direct reproductive traits like embryo size, weight, and positioning provides insight into potential female-controlled aspects of selection (Chapman et al., 2013; Farrell, O'Sullivan, Sacchi, Mariani, 2014; Lyons et al., 2017; Rendón-Herrera, 2023). Statistical differences in these traits are commonly attributed to cryptic female choice, an aspect of sexual selection (Lyons et al., 2017; Rendón-Herrera, 2023). Our findings suggest male skewed paternity, as the largest embryos were sired by the dominant male, indicating potential cryptic sexual selection in the female favoring this sire. Nevertheless, abortions can occur in rays upon capture; therefore, this result could be biased due to the loss of embryos (Adams, Fetterplace, Davis, 2018).

On the other hand, polyandry can drive intersexual conflicts that result in antagonistic coevolution, where female sexual selection mechanisms are countered by opposing male mechanisms (Zeh and Zeh, 2003). Sperm competition, a male reproductive strategy, arises due to the wide variation in multiple mating rates among females (Parker, 1970). In some species of elasmobranchs, sperm competition serves as a selective force influencing sperm morphology (e.g., sperm flagellum length), which can prove advantageous during competitive fertilizations (Rowley et al., 2019). Although it was not possible to evaluate these



traits in the current study, the potential role of sperm competition in *G. marmorata* cannot be ruled out.

This study has certain limitations, particularly the use of only two molecular markers, which restricts the resolution or analysis of the mating system in *G. marmorata*. Increasing the number of molecular markers is essential for achieving a more comprehensive understanding of this species. Currently, genomic population analysis is underway to address this limitation. Despite these constraints, our findings suggest polyandry in *G. marmorata* with skewed male paternity, likely influenced by cryptic sexual selection in the female. Further research on sexual selection mechanisms in elasmobranchs is essential to identify the factors promoting multiple paternity in rays, which may range from female control over oocyte fertilization to selective nutrient allocation to specific offspring. Understanding these dynamics is crucial to uncovering the evolution of mating systems in elasmobranchs.

▶ ACKNOWLEDGEMENTS

We gratefully acknowledge to community of Puerto Libertad, Sonora, for the opportunity to sample their fishery. A special thanks to Felipe Guzman-Morales who performed molecular analysis in lab. Thanks to Erick C. Oñate González and Daniela G. Félix López for their invaluable help in field. Thanks to Alexis O. Tárula-Marín and Juan Rendón-Herrera for his help in data analysis. Special thanks to Andrea L. MacTavish for improving the English text. This work was partial financed by CONACYT (PDCPN2014 No. 248076; awarded to NCSS) and UAS (PROFAPI-2022-A2_004; awarded NCSS).



▶ REFERENCES

- Adams, K. R., Fetterplace, L. C., Davis, A. R., Taylor, D. & Knott, N. A. (2018).** Sharks, rays and abortion: The prevalence of capture-induced parturition in elasmobranchs. *Biological Conservation*, 217, 11-27. doi: 10.1016/j.biocon.2017.10.010
- Aljanabi, S. M., & Martinez, I. (1997).** Universal and rapid salt-extraction of high quality genomic DNA for PCR-based techniques. *Nucleic Acids Research*, 25(22), 4692–4693. doi: 10.1093/nar/25.22.4692
- Armada-Tapia, S., Castillo-Geniz, J. L., Victoria-Cota, N., Arce-Valdés, L. R., & Enríquez-Paredes, L. M. (2023).** First evidence of multiple paternity in the blue shark (*Prionace glauca*). *Journal of Fish Biology*, 102(2), 528–531. doi: 10.1111/jfb.15272
- Birkhead, T. R., Hosken, D. J., & Pitnick, S. (2009).** *Sperm Biology: An Evolutionary Perspective*. Academic Press.
- Birkhead, T. R., & Møller, A. P. (1998).** *Sperm Competition and Sexual Selection*. Academic Press.
- Burgos-Vázquez, M. I. (2013).** Biología reproductiva de la raya mariposa *Gymnura marmorata* (Cooper, 1864) en la costa occidental de Baja California Sur, México. [M.Sc. Thesis, Instituto Politécnico Nacional].
- Byrne, R. J., & Avise, J. C. (2012).** Genetic mating system of the brown smoothhound shark (*Mustelus henlei*), including a literature review of multiple paternity in other elasmobranch species. *Marine Biology*, 159, 749–756.
- Chapman, D. D., Prodöhl, P. A., Gelsleichter, J., Manire, C. A., & Shivji, M. S. (2004).** Predominance of genetic monogamy by females in a hammerhead shark, *Sphyrna tiburo*: Implications for shark conservation. *Molecular Ecology*, 13, 1965–1974.



- Chapman, D. D., Wintner, S. P., Abercrombie, D. L., Ashe, J., Bernard, A. M., Shivji, M. S., & Feldheim, K. A. (2013).** The behavioural and genetic mating system of the sand tiger shark, *Carcharias taurus*, an intrauterine cannibal. *Biology Letters*, 9(3), 20130003. doi: [10.1098/rsbl.2013.0003](https://doi.org/10.1098/rsbl.2013.0003)
- Chevolot, M., Ellis, J., Rijnsdorp, A. D., Stam, W. T., & Olsen, J. L. (2007).** Multiple paternity analysis in the Thornback Ray *Raja clavata* L. *Journal of Heredity*, 98(7), 712–715. doi: [10.1093/jhered/esm077](https://doi.org/10.1093/jhered/esm077)
- Dávila-Ortiz, J. (2002).** Biología reproductiva de la raya mariposa *Gymnura marmorata* (Cooper 1863), en Bahía Almejas, B. C.S., México. [Bachelor's Thesis, Universidad Autónoma de Baja California Sur].
- De Arruda, M. P., Gonçalves, E. C., Schneider, M. P. C., Da Costa Da Silva, A. L., & Morielle-Versute, E. (2010).** An alternative genotyping method using dye-labeled universal primer to reduce unspecific amplifications. *Molecular Biology Reports*, 37(4), 2031–2036. doi: [10.1007/s11033-009-9655-7](https://doi.org/10.1007/s11033-009-9655-7)
- Di Fiore, A. (2003).** Molecular genetic approaches to the study of primate behavior, social organization, and reproduction. *American Journal of Physical Anthropology*, 122: 62-99. doi: [10.1002/ajpa.10382](https://doi.org/10.1002/ajpa.10382)
- Farrell, E. D., Sullivan, N. O., Sacchi, C., & Mariani, S. (2014).** Multiple paternity in the starry smooth-hound shark *Mustelus asterias* (Carcharhiniformes: Triakidae). *Biological Journal of the Linnean Society*, 111, 119–125. doi: [10.1111/bij.12179](https://doi.org/10.1111/bij.12179)
- Jones, A. G. (2005).** GERUD 2.0: A computer program for the reconstruction of parental genotypes from half-sib progeny arrays with known or unknown parents. *Molecular Ecology Notes*, 5(3), 708–711. doi: [10.1111/j.1471-8286.2005.01029.x](https://doi.org/10.1111/j.1471-8286.2005.01029.x)
- Jones, O. R., & Wang, J. (2010).** COLONY: a program for parentage and sibship inference from multilocus genotype data. *Molecular Ecology Resources*, 10(3), 551–555. doi: [10.1111/j.1755-0998.2009.02787.x](https://doi.org/10.1111/j.1755-0998.2009.02787.x)



- Lamarca, F., Carvalho, P. H., Vilasboa, A., Netto-Ferreira, A. L., & Vianna, M. (2020).** Is multiple paternity in elasmobranchs a plesiomorphic characteristic? *Environmental Biology of Fishes*, 103(12), 1463–1470. doi: 10.1007/s10641-020-01034-y
- Lyons, K., Chabot, C. L., Mull, C. G., Paterson Holder, C. N., & Lowe, C. G. (2017).** Who's My Daddy? Considerations for the influence of sexual selection on multiple paternity in elasmobranch mating systems. *Ecology and Evolution*, June. doi: 10.1002/ece3.3086
- Lyons, K., Kacev, D., & Mull, C. G. (2021).** An inconvenient tooth: Evaluating female choice in multiple paternity using an evolutionarily and ecologically important vertebrate clade. *Molecular Ecology*, 30(7), 1574–1593. doi: 10.1111/mec.15844
- Mossman, H. W. (1987).** Vertebrate fetal membranes: Comparative ontogeny and morphology, evolution, phylogenetic significance, basic functions, research opportunities. Rutgers University Press.
- Neff, B. D., & Pitcher, T. E. (2002).** Assessing the statistical power of genetic analyses to detect multiple mating in fishes. *Journal of Fish Biology*, 61, 739–750. doi: 10.1006/jfbi.2002.2101
- Parker, G. A. (1970).** Sperm competition and its evolutionary consequences in the insects. *Biological Reviews*, 45(4), 525–567. doi: 10.1111/j.1469-185X.1970.tb01176.x
- Portnoy, D.S., & Heist, E.J. (2012).** Molecular markers: progress and prospects for understanding reproductive ecology in elasmobranchs. *Journal of Fish Biology*, 80, 1120-1140. doi: 10.1111/j.1095-8649.2011.03206.x
- Portnoy, D. S., Piercy, A. N., Musick, J. A., Burgess, G. H., & Graves, J. E. (2007).** Genetic polyandry and sexual conflict in the sandbar shark, *Carcharhinus plumbeus*, in the western North Atlantic and Gulf of Mexico. *Molecular Ecology*, 16, 187–197.
- Rendón-Herrera, J. J. (2023).** Sistema de apareamiento en *Mustelus henlei*: Influencia de los procesos crípticos post-copulatorios de las hembras en la paternidad múltiple [M.Sc. Thesis, Universidad Autónoma de Sinaloa].



- Rendón-Herrera, J. J., Pérez-Jiménez, J. C., & Saavedra-Sotelo, N. C. (2022).** Regional variation in multiple paternity in the brown smooth-hound shark *Mustelus henlei* from the northeastern Pacific. *Journal of Fish Biology*, 100(6),1399–1406. doi: 10.1111/jfb.15050
- Rowe, S., & Hutchings, J. A. (2003).** Mating systems and the conservation of commercially exploited marine fish. *Trends in Ecology and Evolution*, 18(11), 567–572. doi: 10.1016/j.tree.2003.09.004
- Rowley, A., Locatello, L., Kahrl, A., Rego, M., Boussard, A., Garza-Gisholt, E., Kempster, R. M., Collin, S. P., Giacomello, E., Follesa, M. C., Porcu, C., Evans, J. P., Hazin, F., Garcia-Gonzalez, F., Daly-Engel, T., Mazzoldi, C., & Fitzpatrick, J. L. (2019).** Sexual selection and the evolution of sperm morphology in sharks. *Journal of Evolutionary Biology*, 32(10), 1027–1035. doi: 10.1111/jeb.13501
- Sefc, K. M., & Koblmüller, S. (2009).** Assessing parent numbers from offspring genotypes: The importance of marker polymorphism. *Journal of Heredity*, 100(2), 197–205. doi: 10.1093/jhered/esn095
- Sellas, A. B., Bassos-Hull, K., Hueter, R. E., & Feldheim, K. A. (2011).** Isolation and characterization of polymorphic microsatellite markers from the spotted eagle ray (*Aetobatus narinari*). *Conservation Genetics Resources*, 3(4), 609–611. doi: 10.1007/s12686-011-9415-6
- Tárula-Márin, O. A., & Saavedra-Sotelo, N. C. (2021).** First record of the mating system in the grey smoothhound shark (*Mustelus californicus*). *Marine Biology Research*, 17, 362–368. doi: 10.1080/17451000.2021.1964533
- Uller, T., & Olsson, M. (2008).** Multiple paternity in reptiles: patterns and processes. *Molecular Ecology*, 17: 2566-2580. doi: 10.1111/j.1365-294X.2008.03772.x
- Wang, J. (2004).** Sibship reconstruction from genetic data with typing errors. *Genetics*, 166(4), 1963–1979. doi: 10.1093/genetics/166.4.1963



- Wang, J. (2010).** Effects of genotyping errors on parentage exclusion analysis. *Molecular Ecology*, *19*(22), 5061–5078. doi: 10.1111/j.1365-294X.2010.04865.x
- Wourms, J. P., & Bodine, A. B. (1983).** Biochemical analysis and cellular origin of uterine histotrophe during early gestation of the viviparous butterfly ray. *American Zoologist*, *23*(4), 1018–1018.
- Yano, K., Sato, F., & Takahashi, T. (1999).** Observations of mating behavior of the manta ray, *Manta birostris*, at the Ogasawara Islands, Japan. *Ichthyological Research*, *46*(3), 289–296. doi: 10.1007/BF02678515
- Yokota, L., White, W. T., & De Carvalho, M. R. (2016).** Butterfly rays, Family Gymnuridae. In P. R. Last, W. T. William, M. R. De Carvalho, B. Séret, M. F. W. Stehmann, & G. J. P. Naylor (Eds.), *Rays of the World* (pp. 1032–1052). CSIRO Publishing.
- Zeh, J. A., & Zeh, D. W. (2003).** Toward a New Sexual Selection Paradigm: Polyandry, Conflict and Incompatibility (Invited Article). *Ethology*, *109*(12), 929–950. doi: 10.1046/j.1439-0310.2003.00945.x



Revisión Científica

Una breve revisión sobre los microplásticos en los ecosistemas acuáticos

A brief review on microplastics in aquatic ecosystems



1. Gladys Valencia-Castañeda

Instituto de Ciencias del Mar y Limnología,
Universidad Nacional Autónoma de México,
Unidad Académica Mazatlán, México.

Autor de correspondencia: gladys0908@hotmail.com



2. Alondra G. Sánchez-Rendón

Posgrado en Ciencias en Recursos Acuáticos,
Facultad de Ciencias del Mar, Universidad
Autónoma de Sinaloa, México.



3. Laura L. Bonilla-Aguirre

Posgrado en Ciencias en Recursos Acuáticos,
Facultad de Ciencias del Mar, Universidad
Autónoma de Sinaloa, México.

latindex



CREATIVE COMMONS



OPEN ACCESS

Este es un artículo de acceso abierto distribuido bajo los términos de la Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial-Compartir igual (CC BY-NC-SA 4.0), que permite compartir y adaptar siempre que se cite adecuadamente la obra, no se utilice con fines comerciales y se comparta bajo las mismas condiciones que el original.



Una breve revisión sobre los microplásticos en los ecosistemas acuáticos

A brief review on microplastics in aquatic ecosystems

▶ RESUMEN

La contaminación ambiental causada por los microplásticos (MPs) es, al día de hoy, una de las mayores preocupaciones a nivel mundial; estas partículas se han convertido en contaminantes omnipresentes en todos los ecosistemas, principalmente marinos, lo que plantea importantes riesgos ecológicos y para la salud humana. Actividades como la pesca y la acuicultura se han desarrollado gracias a la modernización e industrialización que comprende el uso de materiales y productos de plásticos que, a su vez, contribuyen a la contaminación de MPs en los ecosistemas naturales y de cultivo. El objetivo de este trabajo es presentar una breve revisión sobre la contaminación de los MPs en los ecosistemas acuáticos, sus características físicas y químicas, así como las técnicas utilizadas para la extracción e identificación de partículas de MPs en biota acuática. Además, se abordan los efectos y la transferencia de los MPs en las cadenas tróficas, la interacción de estas partículas con otros contaminantes y los efectos en la biota acuática y la salud humana.

Palabras clave: Plásticos, Acuicultura, Polímeros, Ingesta, Salud humana



▶ ABSTRACT

Environmental pollution caused by microplastics (MPs) has become one of the major concerns worldwide; these particles have become omnipresent contaminants in all ecosystems, mainly marine ones, posing significant ecological and human health risks. Activities such as fishing and aquaculture have developed thanks to modernization and industrialization, including the use of plastic materials and products, which in turn contribute to MPs contamination in natural and cultivated ecosystems. The objective of this paper is to present a brief review of MPs contamination in aquatic ecosystems, their physical and chemical characteristics, as well as the techniques used for the extraction and identification of MPs particles in aquatic biota. In addition, the effects and transfer of MPs in food chains, the interaction of these particles with other contaminants, and the effects on aquatic biota and human health are addressed.

Keywords: Plastics, Aquaculture, Polymers, Ingestion, Human health

▶ INTRODUCCIÓN

En el último siglo el crecimiento poblacional trajo consigo un crecimiento económico para el cual se volvió fundamental el uso de productos plásticos; este producto proveniente del petróleo envolvió nuestro entorno debido a que es un material muy versátil, duradero, ligero, barato y resistente a la corrosión. Anualmente se producen millones de toneladas de plástico y al ser un producto tan resistente y debido a sus cualidades físicas no se degrada sino que se fragmenta en partículas cada vez más pequeñas llamadas microplásticos (MPs) con un tamaño desde 1-5000 μm (Boettecher et al., 2023; Thompson et al., 2009).

Los MPs son un tema de alta relevancia internacional y uno de los grandes problemas medioambientales del siglo XXI; hoy en día hay un incremento en su estudio y monitoreo, pero los avances en el tema han



sido lentos. La contaminación generalizada de los MPs es un problema mundial creciente, estas partículas se han encontrado en el océano abierto, costas, sedimentos costeros/marinos, plataformas y cuencas de aguas profundas, planteando riesgos ambientales potenciales para una diversidad de organismos acuáticos, principalmente a través de la ingestión (Alomar et al., 2016; Lusher et al., 2015).

Producción de los plásticos

El plástico es un término genérico designado para describir una amplia gama de materiales a base de polímeros que se moldean bajo condiciones específicas de temperatura y presión (FAO, 2017). Químicamente están elaborados a partir de materiales orgánicos, sintéticos o semi-sintéticos, se componen de elementos a base de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, cloro o azufre. Algunas de sus características físicas y químicas son el bajo punto de fusión, baja densidad, baja conductividad eléctrica y térmica, y poca reactividad química; además, bajo costo de producción, durabilidad, ligereza y resistencia a la corrosión lo que ha permitido que la sociedad los use de manera práctica y eficiente en diversas actividades (construcción, transporte, agricultura, medicina, domésticas, pesca, industrias textiles, entre otras) (Cole et al., 2011).

El plástico se utiliza en una amplia variedad de sectores y actividades, por lo tanto, la producción global de plásticos se ha incrementado considerablemente con el paso del tiempo. En la década de 1950, se fabricaban alrededor de 1.5 millones de toneladas anuales, mientras que para el año 2016, esta cifra alcanzó los 335 millones de toneladas (Li et al., 2016; Statista, 2025). Actualmente se producen aproximadamente 413 millones de toneladas de plástico por año (PlasticEurope, 2023) (Figura 1). En México, la producción de plásticos en el 2023 fue de 3.9 millones de toneladas, donde el 47% de la producción corresponde a empresas que fabrican plásticos de un solo uso (Gobierno de México, 2025).

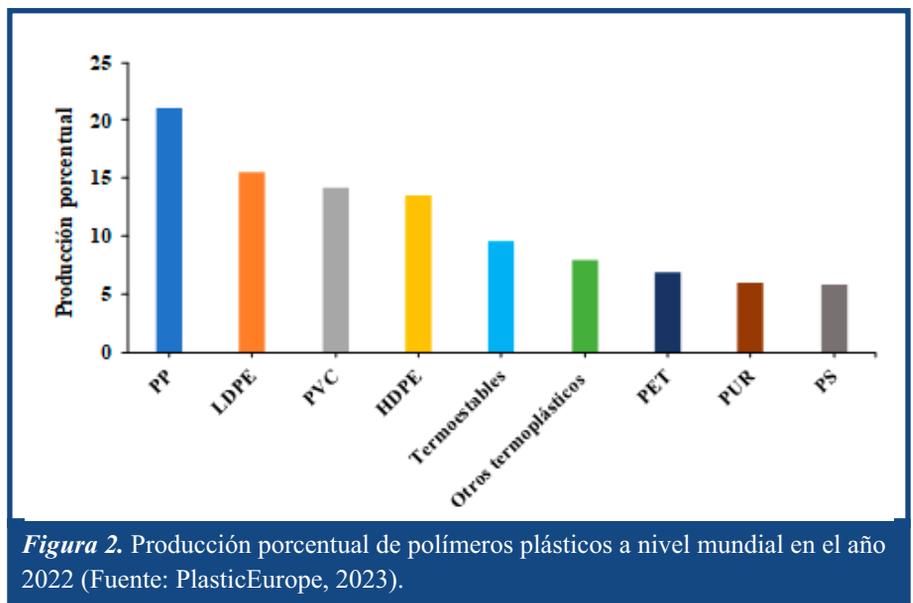


Figura 1. Producción mundial de plástico en la última década (2013-2023) de acuerdo a información de PlasticEurope (2023) y Statistic (2025).

Tipos y uso de los polímeros

Según su origen y proceso de formación los polímeros se pueden clasificar en: (i) polímeros naturales, que son aquellos que se encuentran de forma natural en los organismos vivos, por ejemplo el caucho, los polisacáridos, el almidón, el glucógeno y las proteínas; (ii) polímeros sintéticos, los cuales son fabricados mediante procesos químicos como el poliestireno (PS), polimetacrilato de metilo (acrílico), polipropileno (PP), polietileno (PE), polietileno de baja densidad (LDPE), **polietileno de alta densidad (HDPE)**, cloruro de polivinilo (PVC), etc.; (iii) polímeros de adición, que se obtienen mediante la sucesiva adición de monómeros idénticos o similares sin la eliminación de subproductos (polisacáridos y proteínas); (iv) polímeros de condensación, los cuales, se forman mediante la combinación de dos monómeros diferentes, con la eliminación de moléculas pequeñas como agua, alcohol o ácido durante la reacción de polimerización; y (v) polímeros de reordenamiento, que se producen a partir de reacciones en las que los monómeros sufren cambios estructurales durante la polimerización (Liguori et al., 2021; Sidek et al., 2019).

La diversidad de estos polímeros, tanto naturales como sintéticos, permite su uso en una amplia gama de áreas por sus propiedades únicas y características que los convierten en materiales indispensables en nuestra vida cotidiana (Geyer et al., 2017). En el año 2023, la producción total de plásticos fue de 413.8 millones de toneladas a nivel mundial, siendo el PP, LDPE, PVC y HDPE los polímeros con mayor porcentaje de producción (PlasticEurope, 2023) (Figura 2).



Entre los polímeros sintéticos, el PP es un constituyente importante de muebles, envases y embalajes alimentarios, tuberías y accesorios, así como un componente relevante en la fabricación de automóviles, etc. El LDPE se utiliza para la elaboración de bolsas, botellas para envasado de alimentos, redes, popotes; mientras que el HDPE se encuentra en juguetes, tuberías y accesorios, depósitos de combustible, cableado, botellas de leche y champú, tubos de crema solar, etc. El PVC se usa para la elaboración de bolsas, revestimientos de suelos y paredes, perfiles de ventanas, mosquiteras, tuberías y accesorios, aislamiento de cables, etc. El PS se encuentra en revestimiento interior de refrigeradores, cascos de seguridad, envases alimentarios, aislamiento de edificios, equipos eléctricos y electrónicos, marcos de cristal, etc. El poliuretano (PUR) es usado como aislamiento en edificios, almohadas, colchones, asientos de coches y oficinas, espumas aislantes para refrigeradores, etc. El

tereftalato de polietileno (PET) está presente en botellas de bebidas, aerosoles de limpieza, recipientes para comida preparada, etc. Los termoestables (*e.g.* resina epoxi y siliconas) son usados, como revestimientos, en muebles, vajillas reutilizables, etc. (Andrady, 2011; PlasticEurope, 2023) (Tabla 1).

Tabla 1. Tipos de polímeros plásticos y sus productos utilizados en diferentes actividades.

Tipo de polímeros	Abreviatura	Densidad (gr/cm ³)	Productos de plástico
Polipropileno	PP	0.85-0.83	Tapones de botella, redes, muebles, envases, embalajes alimentarios, tuberías, accesorios
Polipropileno de baja densidad	LDPE	0.91-0.93	Bolsas de plástico, botellas para envasado de alimentos, redes, popotes
Cloruro de polivinilo	PVC	1.38	Cubiertas de plástico, botellas, vasos, bolsas, revestimientos de suelos y paredes, perfiles de ventanas, mosquiteras, tuberías, accesorios, aislamiento de cables
Polipropileno de alta densidad	HDPE	0.94	Juguetes, tuberías y accesorios, depósitos de combustible, cableado, botellas de leche y champú, tubos de crema solar
Termoestables	-		Muebles, construcción
Tereftalato de polietileno	PET	1.37	Botellas de bebidas, aerosoles de limpieza, recipientes para comida preparada
Poliuretano	PUR	1.25	Aislamiento en edificios, almohadas, colchones, asientos de coches y oficinas, espumas aislantes para frigoríficos
Poliestireno	PS	1.05	Utensilios de plástico, recipientes para alimentos, revestimiento interior de refrigeradores, cascos de seguridad, envases alimentarios, aislamiento de edificios, equipos eléctricos y electrónicos, marcos de cristal
Polietileno	PE	0.96	Bolsas de supermercados, aceites, tambores, tuberías para gas, telefonía, guías de cadena, piezas mecánicas
Polimetacrilato de metilo	PMMA	1.18	Cajas para alimentación, señalización
Nylon	PA	1.14	Industria de la pesca
Acetato de celulosa	CA	1.30	Filtros de cigarrillos

Uso de los plásticos en la pesca y acuicultura

En la industria pesquera, la calidad de las redes y artes de pesca han avanzado con la fabricación industrial de plásticos y los equipos ahora están hechos principalmente de materiales sintéticos o semisintéticos. Las cuerdas de fibras sintéticas ofrecen mayor resistencia y durabilidad que las cuerdas de fibra natural, además son más económicas, duraderas y fáciles de manipular (Valdemarsen, 2001). Los materiales plásticos



actualmente se utilizan en la construcción y mantenimiento de embarcaciones; incluso, las redes y los flotadores están fabricados con una variedad de plásticos, incluidos PP, PE, PVC, PS y poliamidas (PA); una vez capturado el producto, éste se coloca en cajas de plástico para su transporte y distribución (FAO, 2016; 2017). En la acuicultura, los sistemas de cultivo han estado cambiando a medida que aumenta la demanda de los consumidores, dando lugar al avance de nuevas tecnologías para las instalaciones de producción, lo que incluye el uso de plásticos. En general, se usan materiales plásticos en diversos utensilios y equipos durante el cultivo de los organismos acuáticos, tal es el caso de las jaulas para peces y el revestimiento de estanques, incluso se utiliza plástico para el embalaje y transporte del producto final (FAO, 2017).

Los plásticos son un componente importante de la pesca y la acuicultura; desafortunadamente una parte de los materiales utilizados en estas actividades se convierten en desechos y pueden ser transportados hasta los ambientes naturales. No existen estimaciones globales de la cantidad de desechos plásticos generados por el sector de la pesca y la acuicultura (Crusot et al., 2023; FAO, 2017). La primera estimación nacional de desechos de la pesca y la acuicultura en los entornos marinos se realizó en Corea del Sur, donde el aporte anual de artes de pesca desechadas se estimó en 44 081 toneladas, 2 374 toneladas de basura arrojada por la borda desde los buques pesqueros y 4 382 toneladas de flotadores perdidos en las instalaciones de acuicultura (Jang et al., 2014).

Contaminación plástica y microplásticos

A la fecha, la contaminación plástica es amplia y es uno de los mayores desafíos ambientales de nuestro tiempo. Una gestión inadecuada de los residuos plásticos en los últimos años ha ocasionado un problema de contaminación en los ambientes acuáticos, situación que podría agravarse en el futuro (Law et al., 2020; Neufeld et al., 2016). En algunos casos, este tipo de contaminación ha representado hasta el 90% de los residuos que llegan al océano. De acuerdo a Geyer et al. (2017), cada año llegan al mar 8 millones de toneladas de plástico que equivalen del 2-5% de lo que se produce al año. La alta dispersión de materiales plásticos en el medio marino se debe principalmente a que son omnipresentes, a sus propiedades flotantes y su tamaño (Campbell et al., 2017; Cole et al.,



2011). Con el tiempo, estos plásticos se descomponen en fragmentos diminutos denominados MPs, los cuales se pueden encontrar dispersos en el agua, suelo y/o aire, representando así un riesgo para la biodiversidad y la salud humana (Rhodes, 2018).

Los MPs son pequeñas partículas plásticas de dimensiones inferiores a 5 mm que se han convertido en un contaminante emergente de origen antropogénico. Estas partículas se clasifican según su origen en primarios y secundarios (Andrady, 2011). Los MPs primarios son partículas diseñadas y fabricadas intencionalmente con tamaños menores a 5 mm, que se utilizan en una variedad de aplicaciones industriales y domésticas, como gránulos de resina, así como microesferas presentes en productos cosméticos y farmacéuticos (GESAMP, 2015; Napper et al., 2015). Por otro lado, los MPs secundarios se generan en el entorno natural a partir de la fragmentación de productos o partículas de plásticos de mayor tamaño influenciada por factores climáticos y ambientales como la radiación ultravioleta, el viento, el flujo del agua, etc (Bollaín et al., 2020).

La fragmentación y/o degradación de los plásticos, que puede ser de varios tipos en función de la causa que la genere, está asociada a la decoloración, el desarrollo de desgastes en su superficie y un aumento en su fragilidad (Wang et al. 2016). La fragmentación de los plásticos de mayor tamaño son una fuente adicional de entrada de MPs a los ecosistemas, ya sea antes de ser desechados en el ambiente, como es el caso de la fragmentación de las fibras sintéticas al lavar la ropa, o una vez que estos plásticos de mayor tamaño ya forman parte del ecosistema y son degradados por diferentes procesos químicos, biológicos y físicos (Browne et al., 2011; Medrano et al., 2015; Tosin et al., 2012).

De acuerdo a su morfología, los MPs se pueden clasificar por su tipo (fragmentos, fibras, gránulos, películas, pellets y espumas); por su forma (irregular, alargado, angular, redondeado, subangular, subredondeado); por su color (transparente, blanco, rojo, rosa, amarillo, café, rojo, naranja, verde, azul, gris, etc.) y por su tamaño (< 5 mm) (Cole et al., 2011; Hidalgo-Ruz et al., 2012; Mbachu et al., 2021).

Los MPs pueden encontrarse en casi todos los hábitats de la Tierra, llegan de diversas maneras y la gran mayoría se encuentran en los ambientes



marinos procedentes directamente de fuentes continentales que se transportan a través de ríos, plantas tratadoras de agua y en menor medida se desplazan de forma aérea. Otra parte de la contaminación se debe a actividades costeras recreativas y económicas como es el caso del turismo, acuicultura, pesca, etc., (Li et al., 2016). Se sabe que los MPs pueden permanecer por décadas o hasta siglos en el ambiente incluso, en los últimos años, alrededor del mundo se han desarrollado investigaciones en las que se ha registrado contaminación plástica tanto en la columna de agua como en los sedimentos, por lo que estas partículas plásticas pueden ser ingeridas por los organismos presentes en los diferentes niveles tróficos (GESAMP, 2015; Tekman et al., 2020). Los MPs han pasado de ser un tema poco considerado a convertirse en un contaminante emergente de gran preocupación a nivel global; su amplia presencia en los ambientes acuáticos y su diminuto tamaño los hacen fácilmente confundibles con organismos acuáticos como el plancton, lo que no solo genera contaminación visual sino que también facilita su ingesta accidental, integrándose así en las cadenas alimentarias de todo el planeta (Abidli et al., 2020; Campbell et al., 2017; Cole et al., 2011).

Transferencia de los microplásticos en la cadena trófica

Los MPs se encuentran presentes en prácticamente todos los hábitats marinos a lo largo del planeta. La densidad de estas partículas de acuerdo con el tipo de polímero (0.8 a 1.4 g/cm^3) (Tabla 1), parecen tener un efecto importante en su distribución, ya que, debido a las diferentes densidades que presentan en función de su composición, estas partículas plásticas se distribuyan en distintas zonas de la columna de agua y los sedimentos bentónicos (Lusher et al., 2015).

Un amplio número de investigaciones han señalado que los organismos de ecosistemas pelágicos y bentónicos puede ingerir MPs debido a sus características físicas, como su color y tamaño, lo que puede incrementar la probabilidad de que los MPs puedan ser confundidos con presas por organismos planctónicos (Shaw & Day, 1994). Debido a que la mayoría de los MPs poseen una densidad que les permite flotar cerca de la superficie, por lo que se encuentran fácilmente disponibles para

una gran diversidad de especies que interactúan con el plancton, por ejemplo, larvas de peces de interés comercial (Fendall et al., 2009).

En ciertos casos, los mecanismos de alimentación no permiten distinguir entre alimentos y MPs, lo que resulta en su ingestión accidental o intencionada, como sucede con el plancton (Moore, 2008). La ingestión de MPs por organismos de los niveles más bajos de la cadena trófica, como el fitoplancton y el zooplancton, puede servir como una vía de entrada para que estos contaminantes lleguen a niveles superiores, esto ocurre cuando los depredadores consumen presas previamente contaminadas con estas partículas (bioacumulación y biomagnificación) (Bhattacharya et al., 2010; Lusher et al., 2015) (Figura 3).



Figura 3. Transferencia de partículas de microplásticos en la cadena trófica.

Interacción de los microplásticos con otros contaminantes

Se ha documentado de manera general que los MPs actúan como vectores para el transporte de otros contaminantes que pueden causar mayor toxicidad en los organismos, como: (i) aditivos, que son compuestos directamente relacionados con la fabricación de los plásticos para proporcionarles ciertas propiedades, por ejemplo, los ftalatos que los hacen más maleables, el bisfenol A, los retardantes de



flama, los antimicrobianos, y aquellos que evitan los daños oxidativos como los nonilfenoles; (ii) metales pesados y contaminantes orgánicos hidrofóbicos, que consisten en elementos y compuestos químicos que se adsorben en las partículas plásticas; como el cobre, zinc, plomo, bifenilos policlorados e hidrocarburos aromáticos policíclicos, etc. (Ashton et al., 2010; Brennecke et al., 2015). Por otro lado, los patógenos, los cuales son considerados contaminantes biológicos que también pueden interactúan con los MPs, en donde actúan como sustrato para diversas comunidades de microorganismos (Harrison et al., 2014).

Efecto de los microplásticos en la biota acuática

Aunque existe una amplia evidencia de la ingesta y presencia de MPs en la biota acuática, es importante señalar que los estudios con organismos experimentales en laboratorio son fundamentales para evaluar los efectos provocados por estos contaminantes (Abidli et al., 2020; Campbell et al., 2017; Cole et al., 2011; Watts et al., 2015). En el grupo de los peces, el pez cebra (*Danio rerio*), ha sido una de las principales especies estudiadas debido a su ciclo de vida corto y su fácil manipulación genética, no obstante, existen otras especies de peces que también han sido utilizados (Banaee et al., 2025; de Sá et al., 2018; Wang et al., 2020). Otro grupo de organismos introducidos para la evaluación de los efectos de los MPs son los crustáceos decápodos, especialmente los de menor tamaño, como los copépodos (de Sá et al., 2018; Bai et al., 2021); aunque especies de mayor tamaño como *Litopenaeus vannamei* y otros crustáceos también han sido evaluados, principalmente por su impacto en el ecosistema y su asociación con la salud humana, al ser especies de importancia comercial (D'Costa, 2022). De igual forma, aunque con menor frecuencia, los moluscos bivalvos también han sido estudiados para determinar el efecto que tienen los MPs, debido a tener una amplia distribución y capacidad filtradora (Khanjani et al., 2023).

Los principales efectos reportados en diferentes organismos acuáticos de la cadena trófica incluyen la obstrucción, disminución de la ingesta de alimento, deterioro estructural del intestino y alteraciones en la función del tracto gastrointestinal (digestión, absorción, etc.) provocando problemas nutricionales y de crecimiento (Cormier et al., 2022; Pedà et



al., 2016; Varó et al., 202; Yin et al., 2018). Además de esto, la translocación de MPs del tracto gastrointestinal a otros órganos y/o tejidos, principalmente de partículas $< 20 \mu\text{m}$, puede provocar inflamación y daños histológicos en diferentes tejidos (Seta et al., 2023; Varó et al., 2021; von Moos et al., 2012).

De igual forma, el estrés oxidativo es uno de los efectos que se han evaluado mayormente en los organismos acuáticos expuestos a MPs; donde se ha observado alteraciones de la actividad enzimática antioxidante (catalasa (CAT), superóxido dismutasa (SOD), glutatión peroxidasa (GPx), glutatión S-transferasa (GST), glutatión reductasa (GSH), etc.). El estrés oxidativo funge como una primera barrera de defensa contra la formación de especies reactivas de oxígeno y el aumento de la peroxidación lipídica (Lu et al., 2016; Wang et al., 2021; Zhou et al., 2023).

Otros efectos por MPs en organismos acuáticos que han sido reportados con menor frecuencia son comportamientos depredadores modificados, interrupción de la actividad natatoria y reservas de energía reducidas (Cormier et al., 2022; Yin et al., 2018). Así mismo, se han reportado efectos en la reducción del éxito de la reproducción, alteraciones en el desarrollo embrionario (De Marco et al., 2022; Lei et al., 2018), perturbación del sistema inmunitario innato e incluso la disminución en la tasa de supervivencia (Lei et al., 2018; Rist et al., 2016; Wang et al., 2021).

No obstante, es importante señalar que el grado de severidad de las respuestas fisiológicas mencionadas anteriormente, puede variar de un organismo a otro, inclusive dentro de la misma especie, esto se debe a diferencias en el diseño experimental, los mecanismos de depuración de cada especie, la etapa de desarrollo de los organismos experimentales, la elección de los tipos y concentraciones de MPs, así como los períodos de exposición y los criterios de efectos a evaluar (de Sá et al., 2018).

En México las investigaciones sobre los efectos de MPs en organismos acuáticos es limitada; sin embargo, en los últimos años se ha observado un incremento en el número de publicaciones, principalmente en especies de tallas pequeñas pertenecientes al zooplancton como los



cladóceros (*Daphnia pulex*) y anfípodos (*Parhyale hawaiiensis*), así como crustáceos de mayor tamaño como los cangrejos violinistas (*Minuca rapax* y *Minuca ecuadoriensis*) (Capparelli et al., 2023; Ramírez-Olivares et al., 2024; Villegas et al., 2022). En el grupo de los anfibios, se tienen investigaciones a nivel experimental con el ajolote *Ambystoma mexicanum* (Manríquez-Guzmán et al., 2023).

Efectos de los microplásticos en la salud humana

En la actualidad, el efecto de los MPs en la salud humana es un tema de gran relevancia, ya que, además de la creciente preocupación por el aumento en la producción de materiales plásticos (Bhuyan, 2022), diversas investigaciones han indicado que estos contaminantes tienen el potencial de infiltrarse en el cuerpo humano a través de la ingestión de agua y alimentos, así como la inhalación de partículas que se encuentran en el aire (Kumar et al., 2022; Ragusa et al., 2022; Yarahmadi et al., 2024). De igual forma, se han identificado MPs en varias muestras biológicas humanas, como pulmones, placenta, heces, hígado, leche materna, corazón y sangre (Horvatits et al., 2022; Jenner et al., 2022; Ragusa et al., 2021; Schwabl et al., 2019; 2022; Yang et al., 2023)

En general, la evidencia científica sugiere que la exposición a los MPs puede provocar lesiones en los tejidos de diversos órganos y disfunción en múltiples sistemas, tal es el caso del digestivo, respiratorio, cardiovascular, inmunológico, reproductivo y endocrino, lo que en consecuencia conduce a enfermedades donde el estrés oxidativo y la inflamación son puntos clave para su desarrollo (Kumar et al., 2022; Lee et al., 2024; Yarahmadi et al., 2024; Zhao et al., 2024). Sin embargo, no hay suficiente información sobre la evaluación toxicológica de los MPs en organismos vivos, por lo que se deben considerar más estudios para poder comprender de una manera integral los efectos de los MPs en la salud humana, lo que nos llevara a poder tomar medidas regulatorias y de mitigación para estos contaminantes.



Técnicas para la extracción e identificación de microplásticos en biota acuática

En la actualidad, las técnicas de análisis de MPs en las diversas matrices (agua, sedimentos y biota) no se han estandarizado, siendo uno de los principales desafíos que se tiene para la extracción y cuantificación de MPs, especialmente en la digestión de material orgánico. Uno de los métodos para la digestión de tejidos más utilizados es con hidróxido de potasio (KOH), el cual ha sido señalado como el método más eficiente para la obtención de MPs sin presentar una degradación significativa de estos (Fernández Severini et al., 2020; Keshavarzifard et al., 2021; Yan et al., 2020). De igual forma, se ha utilizado el peróxido de hidrogeno (H_2O_2), ya que algunos autores coinciden en que es más eficaz para digerir material biogénico (Hossain et al., 2020). De igual forma, el ácido nítrico (HNO_3) y ácido perclórico ($HClO_4$) han sido empleados para la digestión de exoesqueleto y branquias, debido a que son tejidos de material quitinoso y/o resistentes. No obstante, el tratamiento con ácidos ha sido criticado por un sector de la comunidad científica, sugiriendo que estos podrían alterar las propiedades químicas de la superficie de los MPs (Abbasi et al., 2018; Devriese et al., 2015; Valencia-Castañeda et al., 2022).

Como alternativa a la aplicación de ácidos, algunos autores han utilizado la digestión enzimática para eliminar la materia orgánica, obteniendo resultados muy comparables a los que se tienen con la digestión con KOH (Courtene-Jones et al., 2017; von Friesen et al., 2019); no obstante, el conocimiento generado para el uso de la digestión enzimática en matrices más complejas aun es escaso, por lo que realizar estudios con estas técnicas se considera de suma importancia.

La flotación con soluciones salinas (cloruro de sodio, cloruro de zinc, etc.) es una técnica usada para separar partículas con diferentes densidades una vez que la muestra ya se encuentra digerida. En este caso, las partículas de MPs quedan flotando mientras otras partículas más densas se sedimentan en el fondo del recipiente lo que ayuda a minimizar errores en la extracción de otras partículas y en el conteo de MPs (Vermeiren et al., 2020).



La identificación física y el conteo de las partículas de MPs, se realiza con ayuda de un microscopio estereoscópico; donde se identifica el tipo, forma, color y tamaño de los MPs; mientras que la identificación química de los MPs se puede realizar por espectrometría de Infrarrojo por Transformada de Fourier (FTIR) y/o espectroscopia RAMAN (Hidalgo-Ruz et al., 2012; Li et al., 2016). Finalmente, los resultados de las características físicas (tipo, forma, color y tamaño) y químicas (tipo de polímeros) de los MPs encontradas en las muestras analizadas se registran como porcentajes. En cuanto al número de partículas encontradas en biota, éstas se reportan como abundancias de MPs por tejido, MPs por gramo de tejido, MPs por organismo y/o MPs por gramo de organismo (Valencia-Castañeda et al., 2022).

► CONCLUSIÓN

Los MPs son contaminantes presentes en los ecosistemas acuáticos, su tamaño y su amplia distribución han atrapado la atención mundial debido a la ingestión de estas partículas por los organismos, así como la interacción con otros contaminantes y los efectos que puedan ocasionar en las cadenas tróficas, incluyendo al ser humano. En los últimos años ha existido un crecimiento acelerado en el número de investigaciones sobre la contaminación de los MPs; sin embargo, las técnicas para su aislamiento e identificación en la biota acuática y otras matrices ambientales (agua y sedimentos) es un tema de discusión e interés entre la comunidad científica ya que no existen técnicas estandarizadas para su análisis como ocurre con otros contaminantes presentes en los ecosistemas. Es importante seguir realizando investigaciones sobre la contaminación, técnicas y efectos de los MPs en los organismos, aunado a esto, se deben ejecutar programas de seguimiento de la contaminación de los MPs en productos acuáticos para estimar la cantidad de partículas plásticas ingeridas a través del consumo de productos pesqueros y acuícolas.



► LITERATURA CITADA

- Abbasi, S., Soltani, N., Keshavarzi, B., Moore, F., Turner, A., & Hassanaghaei, M. (2018).** Microplastics in different tissues of fish and prawn from the Musa Estuary, Persian Gulf. *Chemosphere*, 205, 80–87. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.076>
- Abidli, S., Akkari, N., Lahbib, Y., & El Menif, N. (2020).** First evaluation of microplastics in two commercial fish species from the lagoons of Bizerte and Ghar El Melh (Northern Tunisia). *Regional Studies in Marine Science*, 41, 101581. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2020.101581>
- Alomar, C., Estarellas, F., & Deudero, S. (2016).** Microplastics in the Mediterranean Sea: deposition in coastal shallow sediments, spatial variation and preferential grain size. *Environmental Research*, 115, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2016.01.005>
- Andrady, A. L. (2011).** Microplastics in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 1596–1605. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.05.030>
- Ashton, K., Holmes, L., & Turner, A. (2010).** Association of metals with plastic production pellets in the marine environment. *Marine Pollution Bulletin*, 60, 2050–2055. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2010.07.014>
- Bai, Z., Wang, N., & Wang, M. (2021).** Effects of microplastics on marine copepods. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 217, 112243. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112243>
- Banaee, M., Multisanti, C.R., Impellitteri, F., Piccione, G., & Faggio, C. (2025).** Environmental toxicology of microplastic particles on fish: A review. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 287, 110042. <https://doi.org/10.1016/j.cbpc.2024.110042>



- Bhattacharya, P., Turner, J. P., & Ke, P. C. (2010).** Physical adsorption of charged plastic nanoparticles affects algal photosynthesis. *The Journal of Physical Chemistry*, 114, 16556–16561. <https://doi.org/10.1021/jp1054759>
- Bhuyan, Md. S. (2022).** Effects of Microplastics on Fish and in Human Health. *Frontiers in Environmental Science*, 10. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.827289>
- Boettcher, H., Jukulka, T., & Cohen, J. H. (2023).** Methods for controlled preparation and dosing of microplastic fragments in bioassays. *Scientific reports*, 13, 5195. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-32250-y>
- Bollaín, C., Bollaín, P. C., & Agulló, D. V. (2020).** Presence of microplastics in water and the potential impact on public health. *Revista Española de Salud Pública*, 93: 1135-5727.
- Brennecke D., Duarte, B., Paiva, F., Caçador, I., & Canning-Clode, J. (2015).** Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 178, 189 - 195. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.12.003>
- Browne, M. A., Crump, P., Niven, S. J., Teuten, E., Tonkin, A., Galloway, T., & Thompson, R. (2011).** Accumulation of microplastic on shorelines worldwide: sources and sinks. *Environmental Science & Technology*, 45, 9175–9179. <https://doi.org/10.1021/es201811s>
- Campbell, S. H., Williamson, P. R., & Hall, D. H. (2017).** Microplastics in the gastrointestinal tracts of fish and the water from an urban prairie creek. *FACETS*, 2, 395-409. <https://doi.org/10.1139/facets-2017-0008>
- Capparelli, M. V., Ramírez, C. A., Rodríguez-Santiago, M. A., Valencia-Castañeda, G., Ávila, E., & Moulatlet, G. M. (2023).** Effect of salinity on microplastic accumulation and osmoregulatory toxicity in the fiddler crab *Minuca rapax*. *Marine Pollution Bulletin*, 193, 115260. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115260>



- Cormier, B., Cachot, J., Blanc, M., Cabar, M., Clérandeau, C., Dubocq, F., Le Bihanic, F., Morin, B., Zapata, S., Bégout, M. L., & Cousin, X. (2022).** Environmental microplastics disrupt swimming activity in acute exposure in *Danio rerio* larvae and reduce growth and reproduction success in chronic exposure in *D. rerio* and *Oryzias melastigma*. *Environmental Pollution*, 308, 119721. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119721>
- Cole, M., Lindeque, K. P., Halsband, C., & Galloway, T. S. (2011).** Microplastics as contaminants in the marine environment: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 62, 2588–2597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>
- Courtene-Jones, W., Quinn, B., Murphy, F., Gary, S. F., & Narayanaswamy, B. E. (2017).** Optimisation of enzymatic digestion and validation of specimen preservation methods for the analysis of ingested microplastics. *Analytical Methods*, 9 (9), 1437–1445. <https://doi.org/10.1039/C6AY02343F>
- Cormier, B., Cachot, J., Blanc, M., Cabar, M., Clérandeau, C., Dubocq, F., Le Bihanic, F., Morin, B., Zapata, S., Bégout, M. L., & Cousin, X. (2022).** Environmental microplastics disrupt swimming activity in acute exposure in *Danio rerio* larvae and reduce growth and reproduction success in chronic exposure in *D. rerio* and *Oryzias melastigma*. *Environmental Pollution*, 308, 119721. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.119721>
- Crusot, M., Gaerther, J.C., Rodriguez, T., Lo, C., & Gaertner-Mazouni, N. (20213).** Assessment of plastic waste generated by the aquaculture industry: The case study of pearl farming in French Polynesia. *Journal of Cleaner Production*, 245, 138902. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138902>
- D'Costa, A. H. (2022).** Microplastics in decapod crustaceans: Accumulation, toxicity and impacts, a review. *Science of The Total Environment*, 832, 154963. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154963>
- De Marco, G., Conti, G. O., Giannetto, A., Cappello, T., Galati, M., Iaria, C., Pulvirenti, E., Capparucci, F., Mauceri, A., Ferrante, M., & Maisano, M. (2022).** Embryotoxicity of polystyrene microplastics in zebrafish *Danio rerio*. *Environmental Research*, 208, 112552. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.112552>



- De Sá, L. C., Oliveira, M., Ribeiro, F., Rocha, T. L., & Futter, M. N. (2018).** Studies of the effects of microplastics on aquatic organisms: What do we know and where should we focus our efforts in the future? *Science of The Total Environment*, 645, 1029–1039. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.207>
- Devriese, L. I., van der Meulen, M. D., Maes, T., Bekaert, K., Paul-Pont, I., Frère, L., Robbens, J., & Vethaak, A. D. (2015).** Microplastic contamination in brown shrimp (*Crangon crangon*, Linnaeus 1758) from coastal waters of the Southern North Sea and Channel area. *Marine Pollution Bulletin*, 98 (1 – 2) , 1 7 9 – 1 8 7 . <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.06.051>
- Fernández Severini, M. D., Buzzi, N. S., Forero López, A. D., Colombo, C. V., Chatelain Sartor, G. L., Rimondino, G. N., & Truchet, D. M. (2020).** Chemical composition and abundance of microplastics in the muscle of commercial shrimp *Pleoticus muelleri* at an impacted coastal environment (Southwestern Atlantic). *Marine Pollution Bulletin*, 161, 111700. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111700>
- FAO. (2016).** Fisheries and Aquaculture topics. Fish capture technology. Topics Fact Sheets. In: FAO Fisheries and Aquaculture Department [online]. Rome. Updated 4 January 2 0 1 6 . [C i t e d 2 N o v e m b e r 2 0 1 6] . <http://www.fao.org/fishery/technology/capture/en>
- FAO. (2017).** Microplastics in fisheries and aquaculture. FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper, Roma, 2017.
- Fendall, L. S., & Sewell, M. A. (2009).** Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. *Marine Pollution Bulletin*, 5 8 , 1 2 2 5 – 1 2 2 8 . <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.025>
- GESAMP. (2015).** In: Kershaw, P.J. (ed.). Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment: a global assessment (rep. stud. GESAMP no. 90). Joint Group of Experts on the Scientific Aspects of Marine Environmental Protection, p. 96. IMO/FAO/UNESCO_IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UNEP/UNDP.
- Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017).** Production, Use, and Fate of All Plastics Ever Made. *Science Advances Research Article*, 3, 5 p. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782>



G o b i e r n o d e M é x i c o . (2 0 2 5) .
<https://www.economia.gob.mx/datamexico/es/profile/industry/plastics-product-manufacturing>.

Hidalgo-Ruz, V., Gutow, L., Thompson, R. C., & Thiel, M. (2012). Microplastics in the marine environment: a review of the methods used for identification and quantification. *Environmental Science & Technology*, 46, 3060–3075. <https://doi.org/10.1021/es2031505>

Harrison, J. P., Schratzberger, M., Sapp, M., & Osborn, A. M. (2014). Rapid bacterial colonization of low-density polyethylene microplastics in coastal sediment microcosms. *BMC Microbiol*, 14: 232. <http://www.biomedcentral.com/1471-2180/14/232>

Hossain, M. S., Rahman, M. S., Uddin, M. N., Sharifuzzaman, S. M., Chowdhury, S. R., Sarker, S., & Nawaz Chowdhury, M. S. (2020). Microplastic contamination in Penaeid shrimp from the Northern Bay of Bengal. *Chemosphere*, 238, 124688. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124688>

Horvatits, T., Tamminga, M., Liu, B., Sebode, M., Carambia, A., Fischer, L., Püschel, K., Huber, S., & Fischer, E. K. (2022). Microplastics detected in cirrhotic liver tissue. *EBioMedicine*, 82, 104147. <https://doi.org/10.1016/j.ebiom.2022.104147>

Jang, Y. C., Lee, J., Hong, S., Mok, J. Y., Kim, K. S., Lee, Y. J., Choi, H. W., Kang, H., & Lee, S. (2014). Estimation of the annual flow and stock of marine debris in South Korea for management purposes. *Marine Pollution Bulletin*, 86 (1): 505-511. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2014.06.021>

Jenner, L. C., Rotchell, J. M., Bennett, R. T., Cowen, M., Tentzeris, V., & Sadofsky, L. R. (2022). Detection of microplastics in human lung tissue using μ FTIR spectroscopy. *Science of The Total Environment*, 831, 154907. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.154907>

Keshavarzifard, M., Vazirzadeh, A., & Sharifinia, M. (2021). Occurrence and characterization of microplastics in white shrimp, *Metapenaeus affinis*, living in a habitat highly affected by anthropogenic pressures, northwest Persian Gulf. *Marine Pollution Bulletin*, 169, 112581. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112581>



- Khanjani, M. H., Sharifinia, M., & Mohammadi, A. R. (2023).** The impact of microplastics on bivalve mollusks: A bibliometric and scientific review. *Marine Pollution Bulletin*, 194, 115271. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115271>
- Kumar, R., Manna, C., Padha, S., Verma, A., Sharma, P., Dhar, A., Ghosh, A., & Bhattacharya, P. (2022).** Micro(nano)plastics pollution and human health: How plastics can induce carcinogenesis to humans? *Chemosphere*, 298, 134267. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134267>
- Law, K. L., Starr, N., Siegler, T. R., Jambeck, J. R., Mallos, N. J., & Leonard, G. H. (2020).** The United States' contribution of plastic waste to land and ocean. *Science Advances*, 6(44) - eabd0288. <https://doi.org/10.1126/sciadv.abd0288>
- Lei, L., Wu, S., Lu, S., Liu, M., Song, Y., Fu, Z., Shi, H., Raley-Susman, K. M., & He, D. (2018).** Microplastic particles cause intestinal damage and other adverse effects in zebrafish *Danio rerio* and nematode *Caenorhabditis elegans*. *Science of The Total Environment*, 619 – 620, 1 – 8. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.103>
- Lee, J.-Y., Chia, R. W., Veerasingam, S., Uddin, S., Jeon, W.-H., Moon, H. S., Cha, J., & Lee, J. (2024).** A comprehensive review of urban microplastic pollution sources, environment and human health impacts, and regulatory efforts. *Science of The Total Environment*, 946, 174297. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.174297>
- Liguori F. Moreno M. C., & Barbaro P. (2021).** Valorisation of plastic waste via metal-catalysed depolymerisation. *Beilstein Journal of Organic Chemistry*. 17, 589 – 621. <https://doi.org/10.3762/bjoc.17.53>
- Li, J., Qu, X., Su, L., Zhang, W., Yang, D., Kolandhasamy, P., Li, D., & Shi, H. (2016).** Microplastics in mussels along the coastal waters of China. *Environmental Pollution*, 214: 177-184. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.04.012>
- Lu, Y., Zhang, Y., Deng, Y., Jiang, W., Zhao, Y., Geng, J., Ding, L., & Ren, H. (2016).** Uptake and accumulation of polystyrene microplastics in ebrafish (*Danio rerio*) and toxic effects in liver. *Environmental Science & Technology*, 50(7), 4054–4060. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00183>



- Lusher, A., Hernandez, M. G., O'Brien, J., Berrow, S., O'Connor, I., & Officer, R. (2015).** Microplastic and macroplastic ingestion by a Deep diving, oceanic cetacean: The True's beaked whale *Mesoplodon mirus*. *Environmental Pollution*, 199, 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.01.023>
- Manríquez-Guzmán, D. L., Chaparro-Herrera, D. J., & Ramírez-García, P. (2023).** Microplastics are transferred in a trophic web between zooplankton and the amphibian Axolotl (*Ambystoma mexicanum*): Effects on their feeding behavior. *Food Webs*, 37, e00316. <https://doi.org/10.1016/j.fooweb.2023.e00316>
- Mbachu, O., Jenkins, G., Kaparaju, P., & Pratt, C. (2021).** The rise of artificial soil carbon inputs: Reviewing microplastic pollution effects in the soil environment. *Science of The Total Environment*, 780, 146569. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146569>
- Medrano, D., Thompson, R. C., & Aldridge, D. C. (2015).** Microplastics in freshwater systems: a review of the emerging threats, identification of knowledge gaps and prioritisation of research needs. *Water Research*, 75, 63–82. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.02.012>
- Moore, C. J. (2008).** Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, longterm threat. *Environmental Research*, 108, 131–139. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2008.07.025>
- Napper, I. E., Bakir, A., Rowland, S. J., & Thompson, R. C. (2015).** Characterisation, quantity and sorptive properties of microplastics extracted from cosmetics. *Marine Pollution Bulletin*, 99, 178–185. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.07.029>
- Neufeld, L., Stassen, F., Sheppard, R., & Gilman, T. (2016).** The new plastic economy: rethinking the future of plastic. *World Economic Forum*, ref080116, Geneva, Switzerland, p. 36.
- Pedà, C., Caccamo, L., Fossi, M. C., Gai, F., Andaloro, F., Genovese, L., Perdichizzi, A., Romeo, T., & Maricchiolo, G. (2016).** Intestinal alterations in European sea bass *Dicentrarchus labrax* (Linnaeus, 1758) exposed to microplastics: Preliminary results. *Environmental Pollution*, 212, 251–256. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.01.083>



- PlasticsEurope. (2023).** “Plastics – the fast Facts 2023”. (2023, octubre 19). <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>.
- Ragusa, A., Notarstefano, V., Svelato, A., Belloni, A., Gioacchini, G., Blondeel, C., Zucchelli, E., De Luca, C., D'Avino, S., Gulotta, A., Carnevali, O., & Giorgini, E. (2022).** Raman Microspectroscopy Detection and characterisation of microplastics in human breastmilk. *Polymers*, 14 (13), 2700. <https://doi.org/10.3390/polym14132700>
- Ragusa, A., Svelato, A., Santacroce, C., Catalano, P., Notarstefano, V., Carnevali, O., Papa, F., Rongioletti, M. C. A., Baiocco, F., Draghi, S., D'Amore, E., Rinaldo, D., Matta, M., & Giorgini, E. (2021).** Plasticenta: First evidence of microplastics in human placenta. *Environment International*, 146, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106274>
- Ramírez-Olivares, A. I., Vargas-Abúndez, J. A., & Capparelli, M. V. (2024).** Microplastics impair the reproductive behavior and life history traits of the amphipod *Parhyale hawaiiensis*. *Marine Pollution Bulletin*, 205, 116630. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116630>
- Rist, S. E., Assidqi, K., Zamani, N. P., Appel, D., Perschke, M., Huhn, M., & Lenz, M. (2016).** Suspended micro-sized PVC particles impair the performance and decrease survival in the Asian green mussel *Perna viridis*. *Marine Pollution Bulletin*, 111 (1 – 2), 213 – 220. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.07.006>
- Rhodes, C. J. (2018).** Plastic Pollution and Potential Solutions. *Science Progress*, 101, 207 – 260. <https://doi.org/10.3184/003685018x15294876706211>
- Schwabl, P., Köppel, S., Königshofer, P., Bucsics, T., Trauner, M., Reiberger, T., & Liebmann, B. (2019).** Detection of various microplastics in human stool. *Annals of Internal Medicine*, 171(7), 453–457. <https://doi.org/10.7326/M19-0618>
- Seta, A. S., Müller, L., Tavella, R., da Silva Júnior, F. M. R., Pedrosa, V., Romano, L. A., Wasielesky, W., Josende, M. E., & Ventura-Lima, J. (2023).** Oxidative effects of consuming microplastics in different tissues of white shrimp *Litopenaeus vannamei*. *Marine Pollution Bulletin*, 193, 115137. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115137>



- Shaw, D. G., & Day, R. H. (1994).** Colour- and form-dependent loss of plastic microdebris from the North Pacific Ocean. *Marine Pollution Bulletin*, 28, 39–43, 302. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(94\)90184-8](https://doi.org/10.1016/0025-326X(94)90184-8)
- Sidek, I. S., Draman, S. F. S., Abdullah, S. R. S., & Anuar, N. (2019).** [Current development on bioplastics and its future prospects: an introductory review](#). *INWASCON Technology Magazine*, 1, 03–08. <http://itechmag.org/paper/volume%201/03-08.pdf>
- Statista. (2025).** Producción de plástico a nivel mundial de 2002 a 2022. <https://es.statista.com/estadisticas/636183/produccion-mundial-de-plastico/>
- PlasticEurope. (2024).** <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2024/>
- Tekman, M. B., Wekerle, C., Lorenz, C., Primpke, S., Hasemann, C., Gerdt, G., & Bergmann, M. (2020).** Tying up loose ends of microplastic pollution in the Arctic: distribution from the sea surface through the water column to deep-sea sediments at the HAUSGARTEN Observatory. *Environmental Science & Technology*, 54 (7), 4079–4090. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06981>
- Thompson, R. C., Moore, C. J., Vom, F. S., & Swan, S. H. (2009).** Plastics, the environment and human health: current consensus and future trends. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 56-70. <https://doi.org/10.1098/rstb.2009.0053>
- Tosin, M., Weber, M., Siotto, M., Lott, C., & Degli, I. F. (2012).** Laboratory test methods to determine the degradation of plastics in marine environmental conditions. *Frontiers in Microbiology*, 3. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2012.00225>
- Valdemarsen, J. W. (2001).** Technological trends in capture fisheries. *Ocean & Coastal Management*, 44, 635–651. [https://doi.org/10.1016/S0964-5691\(01\)00073-4](https://doi.org/10.1016/S0964-5691(01)00073-4)
- Valencia-Castañeda, G., Ruiz-Fernández, A. C., Frías-Espericueta, M. G., Rivera-Hernández, J. R., Green-Ruiz, C. R., & Páez-Osuna, F. (2022).** Microplastics in the tissues of commercial semi-intensive shrimp pond-farmed *Litopenaeus vannamei* from the Gulf of California ecoregion. *Chemosphere*, 297, 134194. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134194>



- Varó, I., Osorio, K., Estensoro, I., Naya-Català, F., Sitjà-Bobadilla, A., Navarro, J. C., Pérez-Sánchez, J., Torreblanca, A., & Piazzon, M. C. (2021).** Effect of virgin low density polyethylene microplastic ingestion on intestinal histopathology and microbiota of gilthead sea bream. *Aquaculture*, 545, 737245. <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2021.737245>
- Vermeiren P., Muñoz C., & Ikejima K. (2020).** Microplastic identification and quantification from organic rich sediments: A validated laboratory protocol. *Environmental Pollution*, 262:114298. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.114298>
- Villegas, L., Cabrera, M., Moulatlet, G. M., & Capparelli, M. (2022).** The synergistic effect of microplastic and malathion exposure on fiddler crab *Minuca ecuadoriensis* microplastic bioaccumulation and survival. *Marine Pollution Bulletin*, 175, 113336. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.113336>
- von Friesen, L. W., Granberg, M. E., Hassellöv, M., Gabrielsen, G. W., & Magnusson, K. (2019).** An efficient and gentle enzymatic digestion protocol for the extraction of microplastics from bivalve tissue. *Marine Pollution Bulletin*, 142, 129–134. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.03.016>
- von Moos, N., Burkhardt-Holm, P., & Köhler, A. (2012).** Uptake and Effects of Microplastics on Cells and Tissue of the Blue Mussel *Mytilus edulis* L. after an Experimental Exposure. *Environmental Science & Technology*, 46(20), 11327–11335. <https://doi.org/10.1021/es302332w>
- Wang, J., Tan, Z., Peng, J., Qiu, Q., & Li, M. (2016).** The behaviors of microplastics in the marine environment. *Marine Environmental Research*, 113, 7–17. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2015.10.014>
- Wang, W., Ge, J., & Yu, X. (2020).** Bioavailability and toxicity of microplastics to fish species: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 189, 109913. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109913>
- Wang, Z., Fan, L., Wang, J., Zhou, J., Ye, Q., Zhang, L., Xu, G., & Zou, J. (2021).** Impacts of microplastics on three different juvenile shrimps: Investigating the organism response distinction. *Environmental Research*, 198, 110466. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110466>



- Watts, A. J. R., Urbina, M. A., Corr, S., Lewis, C., & Galloway, T. S. (2015).** Ingestion of plastic microfibers by the crab *Carcinus maenas* and its effect on food consumption and energy balance. *Environmental Science & Technology*, 49(24), 14597–14604. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b04026>
- Yan, W., Hamid, N., Deng, S., Jia, P. P., & Pei, D. S. (2020).** Individual and combined toxicogenetic effects of microplastics and heavy metals (Cd, Pb, and Zn) perturb gut microbiota homeostasis and gonadal development in marine medaka (*Oryzias melastigma*). *Journal of Hazardous Materials*, 397, 122795. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122795>
- Yang, Y., Xie, E., Du, Z., Peng, Z., Han, Z., Li, L., Zhao, R., Qin, Y., Xue, M., Li, F., Hua, K., & Yang, X. (2023).** Detection of various microplastics in patients undergoing cardiac surgery. *Environmental Science & Technology*, 57(30), 10911–10918. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07179>
- Yarahmadi, A., Heidari, S., Sepahvand, P., Afkhami, H., & Kheradjoo, H. (2024).** Microplastics and environmental effects: investigating the effects of microplastics on aquatic habitats and their impact on human health. *Frontiers in Public Health*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1411389>
- Yin, L., Chen, B., Xia, B., Shi, X., & Qu, K. (2018).** Polystyrene microplastics alter the behavior, energy reserve and nutritional composition of marine jacoever (*Sebastes schlegelii*). *Journal of Hazardous Materials*, 360, 97–105. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.07.110>
- Zhao, B., Rehati, P., Yang, Z., Cai, Z., Guo, C., & Li, Y. (2024).** The potential toxicity of microplastics on human health. *Science of The Total Environment*, 912, 168946. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168946>
- Zhou, N., Wang, Z., Yang, L., Zhou, W., Qin, Z., & Zhang, H. (2023).** Size-dependent toxicological effects of polystyrene microplastics in the shrimp *Litopenaeus vannamei* using a histomorphology, microbiome, and metabolic approach. *Environmental Pollution*, 316, 120635. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120635>